

12+

Николай Атаманенко

# ВЕСЬ МИР В СИСТЕМЕ



T.2

ИНСТРУМЕНТЫ, ДИНАМИКА  
И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

**Николай Атаманенко**  
**Весь мир в системе. Т. 2.**  
**Инструменты, динамика**  
**и прогнозирование**

*<https://litres.ru/74465502>*

*ISBN 9785007123259*

**Аннотация**

Второй том «Инструменты, динамика и прогнозирование» переводит системное мышление в практическую плоскость. Читатель осваивает инструментарий работы со сложными и сверхсложными системами, узнаёт как собирать фрагментарные знания в целостную картину, анализировать устойчивость, кризисы и точки перелома, а также прогнозировать развитие сверхсложных систем через сценарии, слабые сигналы и управление пространством будущих состояний. Для аналитиков, стратегов, прогнозистов и руководителей.

# Содержание

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| Введение к тому 2                         | 8  |
| Часть IV. Инструменты системного анализа  | 11 |
| Глава 21. Карта системы                   | 13 |
| 21.1. Зачем нужна системная карта         | 14 |
| 21.2. Определение объекта и границ        | 15 |
| 21.3. Выделение ключевых элементов        | 17 |
| 21.4. Нанесение связей                    | 18 |
| 21.5. Добавление уровней и контекстов     | 20 |
| 21.6. Выявление белых пятен               | 21 |
| 21.7. Протокол построения системной карты | 22 |
| Итог главы                                | 23 |
| Глава 22. Карта отношений                 | 25 |
| 22.1. Сеть как форма системы              | 26 |
| 22.2. Типология отношений                 | 27 |
| 22.3. Направленность и сила связей        | 29 |
| 22.4. Центральность и периферия           | 30 |
| 22.5. Кластеры и структурные разрывы      | 31 |
| 22.6. Скрытая архитектура сети            | 33 |
| 22.7. Анализ уязвимости сети              | 34 |
| 22.8. Протокол построения карты отношений | 35 |
| Итог главы                                | 45 |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Глава 23. Карта причинности                                  | 47 |
| 23.1. От корреляции к причинной гипотезе                     | 48 |
| 23.2. Причинная цепочка                                      | 49 |
| 23.3. Множественная причинность                              | 50 |
| 23.4. Обратная причинность                                   | 52 |
| 23.5. Причины второго порядка                                | 53 |
| 23.6. Условия возникновения эффекта                          | 54 |
| 23.7. Причинная карта как рабочая гипотеза                   | 55 |
| 23.8. Практический протокол для построения карты причинности | 57 |
| Итог главы                                                   | 70 |
| Глава 24. Диаграммы обратных связей                          | 72 |
| 24.1. От причинной цепочки к причинной петле                 | 73 |
| 24.2. Усиливающие петли                                      | 74 |
| 24.3. Балансирующие петли                                    | 75 |
| 24.4. Комбинации петель                                      | 77 |
| 24.5. Задержки в обратных связях                             | 78 |
| 24.6. Выявление доминирующей петли                           | 79 |
| 24.7. Практика построения диаграммы обратных связей          | 80 |
| Итог главы                                                   | 82 |
| Глава 25. Системная динамика                                 | 84 |
| 25.1. Система как динамическая модель                        | 85 |
| 25.2. Запасы и потоки                                        | 86 |

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| 25.3. Обратные связи в динамической модели                 | 88  |
| 25.4. Задержки                                             | 89  |
| 25.5. Сценарное моделирование                              | 90  |
| 25.6. Калибровка и проверка модели                         | 91  |
| 25.7. Пределы системно-динамического моделирования         | 92  |
| 25.8. Практический протокол построения динамической модели | 93  |
| 25.9. Что даёт динамическая модель                         | 101 |
| Итог главы                                                 | 101 |
| Глава 26. Сетевое мышление                                 | 104 |
| 26.1. Система как сеть                                     | 105 |
| 26.2. Степень связанности                                  | 106 |
| 26.3. Центральность                                        | 107 |
| 26.4. Кластеры и сообщества                                | 109 |
| 26.5. Распространение по сети                              | 110 |
| 26.6. Устойчивость и уязвимость сети                       | 112 |
| 26.7. Динамические сети                                    | 113 |
| 26.8. Практический протокол для сетевого анализа системы   | 115 |
| Итог главы                                                 | 131 |
| Глава 27. Агентное представление                           | 134 |
| 27.1. Кто такой агент                                      | 135 |
| 27.2. Локальные правила                                    | 137 |
| 27.3. Возникновение коллективного                          | 138 |

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| поведения                                                          |     |
| 27.4. Гетерогенность агентов                                       | 140 |
| 27.5. Обучение и адаптация агентов                                 | 141 |
| 27.6. Эксперименты с виртуальной системой                          | 143 |
| 27.7. Сильные и слабые стороны агентного подхода                   | 144 |
| 27.8. Практический протокол для построения агентной модели системы | 145 |
| Итог главы                                                         | 159 |
| Глава 28. Морфологическое пространство                             | 161 |
| 28.1. Что такое морфологическое пространство                       | 162 |
| 28.2. Параметры системы                                            | 163 |
| 28.3. Комбинаторное множество                                      | 165 |
| 28.4. Морфологические ограничения                                  | 166 |
| 28.5. Поиск новых конфигураций                                     | 167 |
| 28.6. Морфологический анализ как инструмент проектирования         | 169 |
| 28.7. От пространства вариантов к пространству возможностей        | 170 |
| 28.8. Практический протокол для морфологического анализа системы   | 171 |
| Конец ознакомительного фрагмента.                                  | 173 |

# **Весь мир в системе. Т. 2 Инструменты, динамика и прогнозирование**

**Николай Атаманенко**

© Николай Атаманенко, 2026

ISBN 978-5-0071-2325-9 (т. 2)

ISBN 978-5-0071-2322-8

Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

# Введение к тому 2

Система становится сверхсложной не потому, что у неё много элементов, а потому, что она способна порождать новые состояния, режимы и правила поведения через взаимодействие своих механизмов. Можно знать, как устроена система и почему она ведёт себя так, а не иначе, но не уметь с ней работать. Можно понимать нелинейность и обратные связи, но не уметь обнаруживать их в конкретной системе. Можно осознавать эмерджентность и самоорганизацию, но не уметь моделировать их. Можно знать о рефлексивности, но не уметь прогнозировать в условиях, когда прогноз меняет прогнозируемое.

Второй том книги «Весь мир в системе» — о переходе от понимания к действию. От анатомии к инструментарию. От видения к навигации в мире сверхсложных систем.

Если первый том можно было бы назвать «как устроен мир, в котором мы живём», то второй том — это ответ на вопрос «как в этом мире действовать?». Он даёт инструменты, позволяющие не просто описывать сверхсложные системы, но и исследовать их, моделировать, прогнозировать и находить точки воздействия.

В Части IV мы возьмём в руки инструменты системного анализа: карты и диаграммы, позволяющие увидеть структуру, причинность и обратные связи; системную динамику

ку, превращающую качественные описания в модели поведения; сетевые и агентные подходы, раскрывающие структуру взаимодействий и эмерджентные эффекты; методы анализа чувствительности, выявляющие критические параметры; и системные рычаги — точки, где минимальное воздействие даёт максимальный эффект.

В Части V мы перейдём от анализа к синтезу. Анализ расчленяет, синтез соединяет. Мы научимся собирать разрозненные модели в целостную картину, работать с многомодельностью, переключать масштабы, сравнивать конкурирующие объяснения и достигать эмерджентного понимания, которое не сводится к сумме частей.

В Части VI мы поместим системы во время. Мы изучим устойчивость и хрупкость, точки перелома, кризисы как системные трансформации, распад и возникновение новых систем, а также принципы управления изменениями в условиях, когда система сопротивляется изменениям и адаптируется к вмешательствам.

В Части VII мы обратимся к прогнозированию. В сверхсложных системах линейная экстраполяция прошлого не работает. Мы научимся работать с пространством возможных будущих, строить сценарии, обнаруживать слабые сигналы, использовать обратное проектирование, стресс-тестировать будущее и управлять пространством возможностей — не предсказывая единственное будущее, а исследуя, какие будущие возможны и от чего они зависят.

Второй том — это инструментарий. Но инструменты не имеют смысла без понимания. Мы будем опираться на фундамент, заложенный в первом томе: на системную оптику и знание механизмов сверхсложности. Инструменты — это способ сделать понимание операциональным. Способ перейти от концепции к анализу. От интуиции к проверяемым гипотезам. От догадок к моделям, которые можно тестировать, уточнять и использовать для решений.

Мы переходим от понимания к действию. Второй том — о том, как не просто понимать сверхсложный мир, но и осознанно в нём действовать.

Продолжаем.

*Николай Атаманенко, г. Белгород, 2026 г.*

## **Часть IV. Инструменты системного анализа**

Инструменты, которые мы освоим, не являются просто набором методов. Они образуют единую систему работы со сверхсложностью. Начиная с простых карт — визуализаций, позволяющих увидеть систему целиком, — мы перейдём к диаграммам причинности и обратных связей, раскрывающим механизмы поведения. Затем освоим системную динамику — моделирование потоков, накоплений и временных зависимостей. Сетевой анализ покажет, как структура связей определяет распространение воздействий. Агентное моделирование позволит исследовать, как из локальных правил возникают глобальные эффекты. Морфологический анализ откроет пространство возможных конфигураций. Анализ чувствительности выявит критические параметры. И наконец, поиск системных рычагов позволит находить точки, где минимальное воздействие даёт максимальный эффект.

Каждый инструмент — это не просто техника. Это способ мышления, закреплённый в операции. Карта — это не рисунок, а способ организации восприятия. Диаграмма обратных связей — не схема, а способ увидеть петли, которые воспроизводят поведение. Модель — не упрощение, а способ выделить существенное. Инструмент становится частью мыш-

ления, когда он не просто применяется, а становится способом видеть.

## Глава 21. Карта системы

Предыдущие части книги были посвящены пониманию. Мы научились видеть систему как целостность, различать её элементы, связи, уровни, структуры, процессы и контексты. Мы погрузились в механизмы, порождающие её поведение. Но понимание остаётся неполным, если оно не переходит в действие. Первый шаг к действию — построение карты системы.

Карта системы — это не просто рисунок или схема. Это инструмент первичной ориентации, позволяющий увидеть систему целиком, зафиксировать её основные элементы, связи и границы, выявить пробелы в знании и определить направления для дальнейшего исследования. Без карты мы блуждаем в деталях, теряя целостность. Без карты мы не можем перейти от интуитивного понимания к систематическому анализу. Карта — это первый шаг от видения к моделированию.

В этой главе мы разберём, зачем нужна системная карта, как определить объект и границы системы, как выделить ключевые элементы, как нанести связи, как добавить уровни и контексты, как выявлять белые пятна и как применять протокол построения системной карты в работе со сверхсложными системами.

## 21.1. Зачем нужна системная карта

Мы склонны упрощать. Вместо того чтобы видеть систему целиком, мы часто видим отдельные фрагменты: список элементов, набор проблем, перечень факторов. Это естественно для нашего восприятия, но для работы со сверхсложными системами недостаточно. Карта системы — это способ преодолеть фрагментарность восприятия.

Карта системы выполняет несколько критических функций.

Во-первых, **интеграция информации**. Мы можем знать множество фактов о системе, но не видеть, как они связаны. Карта позволяет собрать разрозненные знания в единую картину, показывающую, как элементы связаны и как они влияют друг на друга.

Во-вторых, **выявление структуры**. Система — это не просто набор элементов. Это организованная целостность. Карта показывает, как устроена эта организация: какие элементы являются центральными, какие связи критическими, какие уровни существуют.

В-третьих, **обнаружение пробелов**. Когда мы пытаемся нарисовать карту системы, мы сразу сталкиваемся с тем, чего не знаем. Карта делает пробелы в знании видимыми. Это ценно: мы перестаём делать вид, что знаем всё, и начинаем задавать правильные вопросы.

В-четвёртых, **коммуникация**. Карта — это язык, понятный разным участникам. Она позволяет обсуждать систему, согласовывать представления, выявлять расхождения в понимании.

В-пятых, **основа для моделирования**. Карта — это первый шаг к более формальным моделям. Без неё невозможно перейти к диаграммам обратных связей, системной динамике или агентному моделированию.

В сверхсложных системах карта становится не просто полезным инструментом, а необходимой дисциплиной. Сложность здесь такова, что без визуализации мы не можем удерживать целостную картину. Мы вынуждены либо упрощать до потери смысла, либо теряться в деталях. Карта позволяет сохранить существенную сложность, не теряя ясности.

## 21.2. Определение объекта и границ

Построение карты начинается с вопроса: что именно мы исследуем? Это не такой простой вопрос, как кажется. В сверхсложных системах объект исследования часто размыт, а его границы — подвижны.

**Определение объекта.** Что является системой? Каков её состав? Какие элементы мы включаем в рассмотрение? Это зависит от цели исследования. Если мы изучаем организацию, мы можем включить в неё формальную структуру, неформальные коммуникации, культуру, внешние связи.

Выбор зависит от того, что мы хотим понять.

В сверхсложных системах объект редко бывает чётко определённым. Экономика, экосистема, социальная сеть — их границы размыты. Поэтому определение объекта — это не разовое действие, а итеративный процесс. Мы начинаем с рабочего определения, проверяем его, уточняем, пересматриваем.

**Определение границ.** Где заканчивается система и начинается её окружение? Граница определяет, что входит в систему, а что остаётся за её пределами. Но в сверхсложных системах границы подвижны и зависят от цели исследования.

Пример: глобальная цепочка поставок. Если мы хотим понять логистику, мы можем ограничиться движением товаров от производителя к потребителю. Если мы хотим понять уязвимости, мы должны включить поставщиков второго и третьего уровня, политические риски, климатические факторы. Граница расширяется.

При определении границ полезно задавать вопросы:

- Какие элементы мы считаем частью системы, а какие — внешней средой?
- Какие внешние факторы оказывают существенное влияние на поведение системы?
- Какие последствия поведения системы важны для окружения?
- Как изменится анализ, если мы расширим или сузим

границу?

В сверхсложных системах граница часто бывает зоной перехода, а не чёткой линией. Есть элементы, которые одновременно принадлежат и системе, и среде — например, ключевые поставщики, которые являются частью цепочки, но не находятся под полным контролем. Такие элементы требуют особого внимания.

## 21.3. Выделение ключевых элементов

После определения границ мы переходим к выделению элементов — того, из чего состоит система. Но мы не можем включить все элементы. Их слишком много. Мы должны выделить ключевые — те, которые действительно определяют поведение системы.

Какие элементы являются ключевыми?

— **Акторы.** Кто или что действует в системе? Люди, организации, группы, автоматические системы, алгоритмы.

— **Ресурсы.** Что движется внутри системы? Деньги, информация, энергия, товары, внимание, время.

— **Процессы.** Что происходит в системе? Производство, обмен, принятие решений, обучение, адаптация.

— **Структуры.** Какие устойчивые конфигурации существуют? Организационные структуры, институты, правила, нормы.

При выделении элементов важно соблюдать баланс.

Слишком много элементов — карта становится перегруженной и теряет ясность. Слишком мало — мы теряем существенные детали. Критерий прост: элемент должен быть значимым для функции системы. Если его исключение меняет понимание поведения системы, он должен быть включён.

В сверхсложных системах элементы могут быть нестабильными. Они могут появляться, исчезать, менять свои свойства. Например, в социальной сети пользователи приходят и уходят, меняют поведение, создают новые группы. Поэтому карта системы должна фиксировать не только текущий состав элементов, но и их изменчивость. Это означает, что карта должна быть динамической — она должна обновляться по мере изменения системы.

## 21.4. Нанесение связей

Элементы сами по себе ещё не образуют систему. Система возникает, когда элементы соединены связями. Поэтому нанесение связей — это ключевой шаг в построении карты.

Какие связи существуют между элементами?

— **Прямые и косвенные.** Прямая связь — непосредственное взаимодействие. Косвенная — опосредованное через другие элементы.

— **Направленные и ненаправленные.** Направленная связь — влияние идёт в одну сторону. Ненаправленная — в обе.

— **Сильные и слабые.** Сильные связи характеризуются высокой интенсивностью. Слабые — низкой, но они часто важны для распространения новой информации.

— **Устойчивые и временные.** Устойчивые связи сохраняются длительное время. Временные — возникают и исчезают.

При нанесении связей важно не только указать их наличие, но и охарактеризовать:

— **Что передаётся по связи?** Информация, ресурсы, влияние, энергия, доверие.

— **Какова интенсивность связи?** Насколько сильно влияет изменение одного элемента на другой?

— **Каков характер связи?** Это причина-следствие, корреляция, функциональная зависимость, обмен?

В сверхсложных системах связи часто бывают более важными, чем элементы. Изменение структуры связей может изменить поведение системы радикальнее, чем изменение элементов. Поэтому нанесение связей требует не меньшего внимания, чем выделение элементов.

Пример: в организации формальная структура (кто кому подчиняется) и неформальные коммуникации (кто с кем действительно общается) могут сильно различаться. Карта должна отражать оба типа связей, чтобы показать, как система работает на самом деле.

## 21.5. Добавление уровней и контекстов

Система не является плоскостной структурой. Она существует одновременно на нескольких уровнях, и каждый уровень обладает своей логикой. Карта должна отражать эту многоуровневость.

**Уровни системы.** Мы можем выделить:

— **Микроуровень** — отдельные элементы, их локальные взаимодействия.

— **Мезоуровень** — подсистемы, группы, организационные блоки.

— **Макроуровень** — система в целом, её глобальные свойства.

— **Метауровень** — надсистема, контекст, взаимодействие с другими системами.

Карта должна показывать не только сами уровни, но и связи между ними: как микроуровень формирует макроуровень (восходящие влияния) и как макроуровень ограничивает микроуровень (нисходящие влияния).

**Контекст.** Система не существует в вакууме. Она окружена контекстом, который активно формирует её поведение. Контекст включает:

— **Внешнюю среду** — экономические, социальные, экологические, технологические условия.

— **Историю** — прошлые события, которые сформирова-

ли текущее состояние.

— **Институты** — правила, законы, нормы, которые структурируют поведение.

— **Культуру** — ценности, убеждения, смыслы, которые разделяют участники.

Карта должна показывать, как контекст влияет на систему и как система влияет на контекст. Это особенно важно в сверхсложных системах, где контекст часто является не пассивным фоном, а активным участником динамики.

## 21.6. Выявление белых пятен

Одна из самых ценных функций карты — обнаружение белых пятен, того, чего мы не знаем о системе. Белые пятна могут быть:

— **Неизвестные элементы.** Существуют ли элементы, которые мы не включили в карту, но которые влияют на систему?

— **Необъяснённые связи.** Мы видим корреляции, но не понимаем механизмов связи.

— **Непроверенные предположения.** Мы предполагаем, что связь работает так-то, но не проверяли этого.

— **Скрытые петли.** Существуют ли обратные связи, которые мы не видим?

— **Неучтённые задержки.** Есть ли временные разрывы между причиной и следствием, которые мы не учитываем?

Выявление белых пятен — это не признак некомпетентности, а проявление зрелого системного мышления. Хорошая карта не делает вид, что всё известно. Она чётко показывает, где знание заканчивается и начинается неопределённость.

В сверхсложных системах белые пятна неизбежны. Мы не можем знать всё о системе. Задача не в том, чтобы их устранить (это невозможно), а в том, чтобы их осознавать и учитывать в дальнейшем анализе.

## 21.7. Протокол построения системной карты

Построение системной карты — это не хаотичный процесс, а последовательность шагов. Предлагаемый протокол включает семь шагов, которые можно повторять итеративно по мере углубления понимания.

**Шаг 1. Определение границ.** Что включается в систему, а что остаётся за пределами? Почему? Какие внешние факторы могут существенно влиять на поведение системы?

**Шаг 2. Выделение элементов.** Каковы ключевые элементы системы? Акторы, ресурсы, процессы, структуры. Какие элементы являются центральными, какие — периферийными?

**Шаг 3. Нанесение связей.** Как элементы связаны? Какие потоки проходят по связям? Каковы сила, направление

и характер связей?

**Шаг 4. Добавление уровней.** На каких уровнях существует система? Как уровни связаны между собой? Какие восходящие и нисходящие влияния существуют?

**Шаг 5. Добавление контекста.** Какие внешние факторы влияют на систему? Как история, институты, культура формируют её поведение?

**Шаг 6. Выявление пробелов.** Что мы не знаем о системе? Какие предположения требуют проверки? Какие связи мы не понимаем?

**Шаг 7. Динамическое обновление.** Система меняется. Карта должна обновляться. Какие индикаторы показывают, что карта устарела и требует пересмотра?

Этот протокол не является линейным. Мы можем возвращаться к предыдущим шагам по мере того, как новое понимание открывает новые элементы, связи или уровни. Карта — это живой документ, а не статичная схема.

## **Итог главы**

Карта системы — это первый и самый важный инструмент системного анализа. Она позволяет перейти от фрагментарного знания к целостному видению, от интуитивного понимания к систематическому исследованию.

Мы разобрали, зачем нужна карта системы, как определять объект и границы, как выделять ключевые элементы,

наносить связи, добавлять уровни и контексты, выявлять белые пятна. Мы предложили протокол построения карты — от определения границ до динамического обновления.

Особое внимание мы уделили особенностям построения карты для сверхсложных систем. Здесь границы подвижны, элементы нестабильны, связи множественны, белые пятна неизбежны. Карта должна быть не статичным рисунком, а динамическим инструментом, который обновляется по мере изменения системы.

Теперь, когда поняли как может быть построена карта системы, мы готовы к следующему шагу — к карте отношений, которая покажет, как структура связей определяет поведение системы. Мы переходим от того, *из чего состоит система*, к тому, *как её элементы связаны*.

## Глава 22. Карта отношений

В предыдущей главе мы построили карту системы: определили её границы, выделили ключевые элементы, нанесли связи, добавили уровни и контексты. Но карта системы — это лишь первый шаг. Она показывает, *из чего состоит* система, но не раскрывает, *как устроена* сеть взаимодействий, определяющая её поведение.

Карта отношений — это следующий уровень глубины. Она фокусируется не на элементах самих по себе, а на конфигурации связей между ними. Вопрос смещается: не «какие элементы есть в системе?», а «как они связаны?», «кто с кем взаимодействует?», «какова структура этих взаимодействий?».

В сверхсложных системах именно конфигурация отношений часто является определяющим фактором поведения. Две системы с одинаковым набором элементов, но разной структурой связей могут вести себя совершенно по-разному. Две организации с одинаковым штатом и ресурсами могут иметь разную эффективность, если в одной из них коммуникация налажена, а в другой — нет. Два города с одинаковым населением могут иметь разную экономическую динамику, если их транспортные сети устроены по-разному.

В этой главе мы разберём, что такое сеть как форма системы, какие типы отношений существуют, как анализиро-

вать направленность и силу связей, что такое центральность и периферия, как выявлять кластеры и структурные разрывы, как обнаруживать скрытую архитектуру сети и как оценивать её уязвимость.

## **22.1. Сеть как форма системы**

Сеть — это способ представления системы, в котором акцент делается на структуре взаимодействий между элементами. В сетевом представлении система — это множество узлов (элементов), соединённых рёбрами (связями).

Сеть не является просто «ещё одной схемой». Это особый способ видения, при котором поведение системы объясняется не свойствами отдельных элементов, а их положением в структуре взаимодействий. В сетевой логике важны не столько сами узлы, сколько их связи, не столько отдельные акторы, сколько их позиции в сети.

Почему сеть как форма системы так важна для сверхсложных систем?

Во-первых, потому что в сверхсложных системах поведение часто определяется не отдельными элементами, а их взаимодействием. Изменение одного элемента может быть незначительным, но изменение структуры связей может перестроить всю систему.

Во-вторых, потому что сверхсложные системы часто являются децентрализованными. В них нет единого центра

управления, и поведение возникает из распределённых взаимодействий. Сеть позволяет уловить эту распределённую логику.

В-третьих, потому что сверхсложные системы демонстрируют эффекты распространения: информация, влияние, инновации, кризисы — всё это распространяется по сети. Чтобы понять эти эффекты, необходимо понимать структуру сети.

Пример: глобальная финансовая система. Её поведение определяется не отдельными банками (элементами), а структурой связей между ними — кто кому должен, кто от кого зависит, как распространяется паника. Изменение структуры связей может изменить устойчивость всей системы.

## 22.2. Типология отношений

Отношения между элементами могут быть разных типов, и это различие важно для понимания поведения системы. Карта отношений должна фиксировать не только наличие связи, но и её характер.

Основные типы отношений:

— **Кооперация** — элементы работают вместе для достижения общих целей. Пример: партнёрство между компаниями, сотрудничество между отделами.

— **Конкуренция** — элементы борются за ресурсы, внимание, статус. Пример: конкуренция между компаниями на

рынке, борьба за бюджет внутри организации.

— **Зависимость** — один элемент зависит от другого в плане ресурсов, информации, решений. Пример: зависимость производства от поставщиков, зависимость сотрудника от руководителя.

— **Обмен** — элементы обмениваются ресурсами, информацией, ценностями. Пример: рыночный обмен, обмен знаниями в профессиональном сообществе.

— **Контроль** — один элемент контролирует или ограничивает поведение другого. Пример: регуляторный контроль, управленческая иерархия.

— **Конфликт** — элементы имеют противоположные цели и активно противостоят друг другу. Пример: трудовой конфликт, политическое противостояние.

— **Посредничество** — элемент соединяет другие элементы, которые не имеют прямых связей. Пример: координатор между двумя отделами, брокер на рынке.

В сверхсложных системах отношения редко бывают одного типа. Между одними и теми же элементами могут одновременно существовать кооперация и конкуренция, зависимость и контроль. Карта отношений должна отражать эту многомерность.

Пример: отношения между двумя технологическими компаниями. Они могут конкурировать на одном рынке (конкуренция), сотрудничать в разработке стандартов (кооперация), зависеть от одного поставщика (зависимость) и обме-

ниваться патентами (обмен). Все эти типы отношений существуют одновременно и влияют на поведение каждой компании.

## 22.3. Направленность и сила связей

Две важные характеристики связей — направленность и сила. Они определяют, как именно взаимодействуют элементы.

**Направленность.** Связь может быть:

— **Односторонней** — влияние идёт только в одном направлении. Пример: А влияет на Б, но Б не влияет на А.

— **Взаимной** — влияние идёт в обоих направлениях. Пример: А влияет на Б, и Б влияет на А.

В сверхсложных системах большинство связей являются взаимными, но с разной интенсивностью в каждом направлении. Например, в отношениях между руководителем и подчинённым влияние руководителя на подчинённого обычно сильнее, чем обратное.

**Сила.** Связь может быть:

— **Сильной** — высокой интенсивности, частоты, значимости. Пример: тесное сотрудничество между двумя отделами.

— **Слабой** — низкой интенсивности, частоты, значимости. Пример: случайное знакомство, эпизодический обмен информацией.

В сетевом анализе слабые связи часто оказываются не менее важными, чем сильные. Именно через слабые связи распространяется новая информация, которая не циркулирует внутри плотных групп. Слабые связи соединяют разные кластеры, позволяя системе быть связанной без избыточной плотности.

Пример: в организации сильные связи — это регулярные взаимодействия внутри команды. Слабые связи — это эпизодические контакты между разными отделами. Именно через слабые связи распространяются инновации, потому что внутри команды все знают одно и то же.

## 22.4. Центральность и периферия

В любой сети есть элементы, которые занимают особые позиции. Одни находятся в центре, другие — на периферии. Центральность — это мера того, насколько элемент является важным узлом в сети.

Существует несколько типов центральности:

— **Степенная центральность** — количество связей, которые имеет элемент. Элемент с высокой степенью центральности связан со многими другими. Это «хаб» сети.

— **Посредническая центральность** — степень, в которой элемент является посредником между другими элементами. Элемент с высокой посреднической центральностью соединяет разные части сети, которые иначе не были бы свя-

заны.

— **Центральность близости** — степень, в которой элемент близок ко всем остальным элементам сети. Элемент с высокой близостью может быстро взаимодействовать с любым другим элементом.

В сверхсложных системах элементы с высокой центральностью являются критическими точками. Их изменение или потеря может иметь непропорционально большое влияние на всю систему. Поэтому при поиске системных рычагов мы обращаем внимание именно на такие элементы.

Пример: в социальной сети центральные пользователи (с большим количеством связей) могут быстро распространять информацию. Посредники (которые соединяют разные группы) могут контролировать потоки информации между группами. Потеря центрального пользователя или посредника может изменить динамику всей сети.

Важно понимать, что центральность — это не постоянная характеристика. В сверхсложных системах центры могут смещаться. То, что было центром вчера, может стать периферией завтра. Поэтому карта отношений должна быть динамической, фиксирующей не только текущую центральность, но и её изменения.

## **22.5. Кластеры и структурные разрывы**

Сети редко бывают однородными. В них обычно выделя-

ются кластеры — группы элементов, тесно связанных друг с другом, но слабо связанных с другими группами. Между кластерами существуют структурные разрывы — промежутки, через которые связи проходят редко.

Кластеры важны, потому что внутри них информация и влияние распространяются быстро, а между ними — медленно. Кластеры создают «пузыри», в которых формируются локальные нормы, убеждения, практики. Структурные разрывы между кластерами могут быть как барьерами (блокируют распространение), так и мостами (через них передаётся новая информация).

Пример: в организации кластеры могут соответствовать отделам или проектным группам. Внутри каждого кластера — интенсивные коммуникации. Между кластерами — более редкие контакты. Это создаёт как преимущества (специализация внутри кластеров), так и проблемы (недостаток координации между ними).

В сверхсложных системах кластеры часто возникают спонтанно, через самоорганизацию. Они не планируются, а возникают из локальных взаимодействий. Обнаружение кластеров и структурных разрывов — важная задача карты отношений, потому что через них можно понять, как система структурируется и как в ней распространяются изменения.

## 22.6. Скрытая архитектура сети

Не все связи в системе лежат на поверхности. Существует скрытая архитектура сети — отношения, которые не видны при первом взгляде, но оказывают существенное влияние на поведение системы.

Скрытая архитектура может включать:

— **Неформальные связи** — отношения, которые существуют вне формальных структур. В организации это могут быть дружеские связи, неформальные каналы коммуникации, негласные коалиции.

— **Опосредованные связи** — влияния, передаваемые через цепочку промежуточных элементов. Например, А влияет на Б через В, и эта опосредованная связь может быть столь же сильной, как и прямая.

— **Связи с задержкой** — отношения, которые проявляются только спустя время. Сегодняшнее решение может повлиять на элемент через месяцы или годы.

— **Латентные связи** — отношения, которые активируются только в определённых условиях. В нормальном режиме они не видны, но в кризисной ситуации становятся критическими.

Пример: в финансовой системе связи между банками через кредитные линии могут быть скрытыми для внешнего наблюдателя. Но в кризисной ситуации эти скрытые свя-

зи становятся критическими — паника распространяется именно по ним.

Обнаружение скрытой архитектуры сети — одна из самых сложных и самых ценных задач системного анализа. Это требует не только наблюдения за явными связями, но и анализа косвенных влияний, временных задержек, неформальных отношений. Карта отношений должна включать не только то, что видно, но и то, что скрыто.

## 22.7. Анализ уязвимости сети

Карта отношений позволяет оценить уязвимость сети — её способность сохранять целостность при изменениях. Вопрос: что произойдёт, если какой-то элемент или связь исчезнут, ослабнут или изменятся?

Анализ уязвимости включает:

— **Идентификацию критических узлов.** Какие элементы являются структурными точками, без которых сеть распадается на части? Это могут быть центральные узлы или посредники.

— **Идентификацию критических связей.** Какие связи являются ключевыми для связности сети? Их разрыв может привести к фрагментации.

— **Оценку каскадных эффектов.** Если один элемент выходит из строя, как это распространяется по сети? Есть ли механизмы, которые усиливают или ослабляют распростра-

нение?

— **Оценку избыточности.** Есть ли в сети резервные пути, которые могут компенсировать потерю критических элементов? Избыточность повышает устойчивость.

Пример: глобальные цепочки поставок. Анализ уязвимости показывает, какие поставщики являются критическими узлами, без которых цепочка останавливается. Если такой поставщик выходит из строя, эффект распространяется по всей сети через каскадные зависимости.

В сверхсложных системах уязвимость часто бывает скрытой. Система может казаться устойчивой в нормальном режиме, но иметь скрытые структурные уязвимости, которые проявляются только при нагрузке. Поэтому анализ уязвимости — это не разовая процедура, а непрерывное исследование, особенно в условиях изменений.

## **22.8. Протокол построения карты отношений**

Ниже представлен практический протокол построения карты отношений — пошаговая процедура, позволяющая перейти от общего понимания системы к структурированному анализу сети взаимодействий.

Протокол предназначен для практического применения. Он включает последовательность шагов, конкретные вопросы, методы сбора данных и инструменты анализа.

## **Шаг 1. Определение границ сети**

**Что делаем:** определяем, какие элементы включаются в сеть, а какие остаются за её пределами.

### **Вопросы:**

- Какие акторы участвуют в исследуемом процессе?
- Какие элементы, даже если они не являются непосредственными участниками, оказывают существенное влияние на взаимодействия?
- Где проходит граница между внутренней сетью и внешним окружением?
- Какие связи с внешним окружением необходимо учитывать?

**Практический совет:** начните с расширенного списка, а затем сужайте его, исключая элементы, которые не влияют на исследуемое поведение.

**Результат:** список элементов сети.

## **Шаг 2. Выбор типов отношений для анализа**

**Что делаем:** определяем, какие типы отношений будем анализировать. В одной системе может существовать множество типов связей; попытка учесть их все одновременно может привести к перегрузке.

### **Вопросы:**

- Какие типы отношений наиболее важны для понимания поведения системы?

— Какие типы отношений мы будем анализировать в первую очередь?

— Будем ли мы анализировать один тип (например, только формальные связи) или несколько?

### **Варианты типов отношений:**

— Формальные (организационные, иерархические).

— Неформальные (дружеские, доверительные).

— Информационные (обмен данными, знаниями).

— Ресурсные (обмен материальными или финансовыми ресурсами).

— Влияния (кто на кого влияет).

— Зависимости (кто от кого зависит).

— Конфликтные (противостояние).

**Практический совет:** начните с одного-двух типов отношений, добавляйте остальные по мере необходимости.

**Результат:** перечень типов отношений, включённых в карту.

## **Шаг 3. Сбор данных о связях**

**Что делаем:** собираем информацию о том, какие связи существуют между элементами.

### **Методы сбора данных:**

— Наблюдение: прямое наблюдение за взаимодействиями.

— Опросы: вопросы участникам («С кем вы взаимодействуете?», «Кто влияет на ваши решения?», «Кому вы дове-

ряете?»).

— Анализ документов: изучение организационных схем, протоколов, отчётов.

— Анализ данных: изучение потоков информации, транзакций, коммуникаций.

— Экспертные интервью: беседы с людьми, хорошо знающими систему.

### **Вопросы для сбора данных:**

— С какими элементами взаимодействует данный элемент?

— Какова интенсивность взаимодействия?

— Какова направленность связи?

— Какова сила влияния?

— Какой характер носит связь?

**Практический совет:** для каждого типа отношений собирайте данные отдельно. Сначала формальные связи, затем неформальные.

**Результат:** список связей между элементами с характеристиками.

## **Шаг 4. Визуализация сети**

**Что делаем:** строим графическое представление сети.

### **Инструменты визуализации:**

— Ручная отрисовка (для небольших сетей).

— Программное обеспечение: Gephi, NodeXL, UCINET, Pajek.

— Онлайн-инструменты: Kumu, Graph Commons.

### **Правила визуализации:**

— Узлы изображаются в виде точек или кругов.

— Связи — в виде линий между узлами.

— Для разных типов связей используйте разные цвета или типы линий.

— Силу связи показывайте толщиной линии.

— Направленность — стрелками.

**Практический совет:** начните с простой визуализации.

Визуализируйте разные типы отношений отдельно, затем объединяйте.

**Результат:** визуальное представление сети.

## **Шаг 5. Анализ структуры сети**

**Что делаем:** анализируем структуру сети, выявляем ключевые элементы и паттерны.

### **Параметры анализа:**

#### **5.1. Степень связанности**

— Какова плотность сети?

— Есть ли изолированные элементы?

— Есть ли элементы с очень высокой степенью?

#### **5.2. Центральность**

— **Степенная центральность:** кто имеет наибольшее число связей?

— **Посредническая центральность:** кто является мо-

стом между разными частями сети?

— **Центральность близости:** кто находится ближе всего ко всем остальным узлам?

### **Вопросы для анализа:**

— Кто является центральными узлами? Почему?

— Какие узлы являются посредниками между разными частями сети?

— Какие узлы находятся на периферии?

— Как изменится сеть при удалении центральных узлов или посредников?

## **5.3. Кластеры и структурные разрывы**

— Есть ли в сети кластеры?

— Как они связаны между собой?

— Есть ли структурные разрывы?

## **5.4. Анализ путей распространения**

— Каковы кратчайшие пути между разными частями сети?

— Как быстро распространяется информация или влияние?

— Есть ли альтернативные пути?

**Практический совет:** используйте сетевые метрики (при наличии инструментов) или качественный анализ (для небольших сетей).

**Результат:** описание структуры сети, выявление ключевых элементов и паттернов.

## **Шаг 6. Выявление скрытой архитектуры**

**Что делаем:** ищем неочевидные связи и зависимости.

### **Вопросы:**

— Какие неформальные связи не отражены в формальной структуре?

— Есть ли опосредованные связи?

— Есть ли связи с задержкой?

— Есть ли латентные связи?

### **Методы выявления:**

— Анализ косвенных влияний.

— Интервью с участниками.

— Анализ расхождений между формальной и неформальной структурами.

**Практический совет:** сравните формальную и неформальную структуру. Расхождения между ними часто указывают на скрытую архитектуру.

**Результат:** выявленные скрытые связи и зависимости.

## **Шаг 7. Оценка уязвимости сети**

**Что делаем:** анализируем, насколько сеть устойчива к изменениям.

### **Вопросы:**

— Какие узлы являются критическими?

— Какие связи являются критическими?

— Как быстро восстанавливается сеть после потери узла

или связи?

— Есть ли резервные пути?

### **Сценарии для тестирования:**

— Удаление центрального узла.

— Удаление посредника.

— Разрыв критической связи.

— Одновременное удаление нескольких элементов.

**Практический совет:** начните с анализа сценария «исчезновение самого центрального узла».

**Результат:** оценка уязвимости сети, список критических узлов и связей.

## **Шаг 8. Интерпретация и выводы**

**Что делаем:** переводим анализ сети в понимание поведения системы.

### **Вопросы:**

— Как структура сети объясняет наблюдаемое поведение системы?

— Какие элементы и связи являются ключевыми для понимания динамики?

— Где находятся рычаги воздействия?

— Какие риски существуют из-за уязвимости сети?

**Практический совет:** свяжите выводы с вопросами, которые ставили в начале анализа. Что нового вы узнали о системе?

**Результат:** понимание того, как структура отношений

определяет поведение системы, и идентификация точек воздействия.

## **Связь с другими инструментами**

Карта отношений является входом для:

- Карты причинности — показывает, через какие элементы и связи распространяются причинные влияния.
- Диаграммы обратных связей — показывает, как структура отношений создаёт петли.
- Системной динамики — показывает, какие элементы и связи должны быть включены в модель.
- Поиска рычагов — показывает, где находятся критические точки для воздействия.

## **Итоговый результат**

Карта отношений даёт:

- **Визуальное представление** структуры взаимодействий.
- **Выявление ключевых элементов** (центральные узлы, посредники).
- **Понимание структуры** (кластеры, разрывы, пути распространения).
- **Оценку уязвимости** (критические узлы и связи).
- **Идентификацию рычагов воздействия** (точки, изменение которых даёт максимальный эффект).

Карта отношений не является самоцелью. Она является

инструментом для понимания того, как конфигурация взаимодействий определяет поведение системы. Следующий шаг — использование этой карты для построения причинных моделей и выявления механизмов, порождающих системную динамику.

## **22.9. Пример применения протокола (краткий)**

**Система:** Организация (компания из 50 человек).

**Шаг 1.** Границы: все сотрудники компании, исключены внешние консультанты.

**Шаг 2.** Тип отношений: формальные (подчинение), неформальные (коммуникация вне формальных рамок), информационные (обмен знаниями).

**Шаг 3.** Сбор данных: опрос сотрудников («С кем вы общаетесь по рабочим вопросам?», «К кому обращаетесь за советом?»).

**Шаг 4.** Визуализация: построены три сети — формальная, неформальная, информационная.

**Шаг 5.** Анализ: выявлены два неформальных лидера (центральные узлы), через которых проходит большая часть коммуникации. Один посредник соединяет два отдела, которые формально не связаны. Информационная сеть менее плотная, чем неформальная.

**Шаг 6.** Скрытая архитектура: обнаружена неформальная группа влияния, которая определяет принятие решений, хотя формально не имеет полномочий.

**Шаг 7.** Уязвимость: удаление одного неформального лидера приведёт к фрагментации сети. Удаление посредника изолирует один отдел.

**Шаг 8.** Интерпретация: неформальная структура определяет реальное принятие решений. Рычаг воздействия — работа с неформальными лидерами. Риск — потеря ключевого неформального лидера.

## Итог главы

Карта отношений — это следующий уровень системного анализа после карты системы. Она фокусируется не на элементах самих по себе, а на структуре взаимодействий между ними. Именно конфигурация отношений часто определяет поведение сверхсложной системы.

Мы разобрали, что такое сеть как форма системы, какие типы отношений существуют (кооперация, конкуренция, зависимость, обмен, контроль, конфликт, посредничество). Обсудили направленность и силу связей, показали, что слабые связи не менее важны, чем сильные, особенно для распространения новой информации.

Мы рассмотрели понятие центральности (степенная, посредническая, близости) и показали, что центральные элементы и посредники являются критическими точками системы. Обсудили кластеры и структурные разрывы, которые структурируют сеть и определяют, как распространяются из-

менения.

Особое внимание мы уделили скрытой архитектуре сети — неформальным, опосредованным, задержанным и латентным связям, которые не лежат на поверхности, но часто определяют поведение системы. И завершили анализом уязвимости — способностью сети сохранять целостность при изменениях.

Теперь, когда мы понимаем структуру отношений в системе, мы готовы к следующему шагу — к карте причинности. Мы переходим от вопроса «как связаны элементы?» к вопросу «почему система ведёт себя так, а не иначе?». Мы будем исследовать причинные механизмы, которые превращают структуру отношений в поведение системы.

## Глава 23. Карта причинности

Мы построили карту системы — увидели её элементы, связи, уровни и контексты. Мы построили карту отношений — увидели структуру взаимодействий, центральные узлы, кластеры и структурные разрывы. Но остаётся главный вопрос: *почему система ведёт себя так, а не иначе?*

Карта причинности — это переход от описания к объяснению. Она показывает не просто то, что элементы связаны, а *как* они влияют друг на друга, какие механизмы порождают наблюдаемое поведение, какие факторы являются причинами, а какие — условиями или триггерами.

В сверхсложных системах причинность редко бывает простой. Здесь редко работает схема «А вызывает Б». Здесь действуют множественные причины, петли обратной связи, задержки, скрытые механизмы, контекстуальные зависимости. Поэтому карта причинности — это не поиск «главной причины», а исследование сети причинных отношений, их структуры, силы и динамики.

В этой главе мы разберём, как перейти от корреляции к причинной гипотезе, как строить причинные цепочки, как работать с множественной причинностью, как выявлять обратную причинность, как обнаруживать причины второго порядка, как различать причины и условия и как использовать причинную карту как рабочую гипотезу, а не оконча-

тельную истину.

## 23.1. От корреляции к причинной гипотезе

Мы часто путаем корреляцию и причинность. Два явления могут изменяться вместе, но это не означает, что одно вызывает другое. Они могут быть следствием третьего фактора, или связь между ними может быть случайной.

Переход от корреляции к причинной гипотезе — это первый и самый важный шаг в построении карты причинности. Он требует не только наблюдения, но и анализа механизмов.

Корреляция показывает, что два явления связаны статистически. Причинность показывает, что изменение одного явления приводит к изменению другого через конкретный механизм.

Пример: в городе растёт число пожарных станций и растёт число пожаров. Корреляция есть. Но причина не в том, что пожарные станции вызывают пожары. Оба явления связаны с ростом города.

Как перейти от корреляции к причинной гипотезе?

— **Анализ временной последовательности.** Причина должна предшествовать следствию. Если мы видим, что изменение А происходит до изменения Б, это поддерживает причинную гипотезу.

— **Анализ механизма.** Мы должны понять, *как* А может

вызывать Б. Без механизма причинность остаётся гипотетической.

— **Исключение альтернативных объяснений.** Мы должны проверить, не является ли связь результатом третьего фактора или случайности.

— **Проверка на разных условиях.** Если связь сохраняется в разных контекстах, это укрепляет причинную гипотезу.

В сверхсложных системах переход от корреляции к причинности особенно сложен. Здесь много факторов, они взаимодействуют, и их влияние может быть опосредованным или отсроченным. Поэтому причинные гипотезы в сверхсложных системах всегда остаются вероятностными, а не абсолютными.

## 23.2. Причинная цепочка

Простейшая форма причинности — причинная цепочка. А влияет на Б, Б влияет на В, В влияет на Г. Это последовательное распространение воздействия через цепочку элементов.

Причинные цепочки важны, потому что они показывают, как воздействие распространяется в системе. Они также показывают, что причина и следствие могут быть разделены промежуточными звеньями. То, что мы наблюдаем как следствие (Г), может быть вызвано причиной (А), которая нахо-

дится далеко в цепочке.

Пример: экономический кризис. А — рост процентных ставок. Б — снижение инвестиций. В — сокращение производства. Г — рост безработицы. Цепочка показывает, как одно решение приводит к результату через несколько шагов.

При построении причинных цепочек важно:

— **Не пропускать промежуточные звенья.** Если мы переходим от А сразу к Г, мы теряем понимание механизма.

— **Проверять каждое звено.** Действительно ли А влияет на Б? Действительно ли Б влияет на В?

— **Учитывать обратные связи.** Цепочка может замыкаться: Г может влиять на А, создавая петлю.

В сверхсложных системах причинные цепочки редко бывают линейными. Они переплетаются, создавая сети, где одно воздействие может идти по множеству путей одновременно.

## 23.3. Множественная причинность

В сверхсложных системах почти никогда не бывает одной причины. Результат обычно является следствием множества факторов, действующих одновременно и влияющих друг на друга. Это множественная причинность.

Множественная причинность означает, что:

— **Один результат может иметь несколько причин.** Например, успех компании зависит от стратегии, команды,

рынка, технологий, удачи.

— **Одна причина может иметь несколько результатов.** Например, изменение климата влияет на экосистемы, экономику, здоровье, миграцию.

— **Причины могут взаимодействовать.** Комбинация факторов может давать эффект, который не следует из суммы их отдельных влияний.

Пример: здоровье человека. Оно зависит от генетики, питания, физической активности, стресса, экологии, социальных условий. Ни один фактор не является единственной причиной. Они взаимодействуют, усиливая или ослабляя друг друга.

При построении карты множественной причинности важно:

— **Не сводить сложность к одной причине.** Искать все значимые факторы, а не только самый очевидный.

— **Анализировать взаимодействия.** Как факторы влияют друг на друга? Есть ли синергия или антагонизм?

— **Оценивать силу влияния.** Какие факторы являются главными, а какие — второстепенными?

В сверхсложных системах множественная причинность является правилом, а не исключением. Поэтому карта причинности должна быть сетью, а не цепочкой.

## 23.4. Обратная причинность

В сверхсложных системах причинность часто не является односторонней. Результат может влиять на исходную причину, создавая петли. Это обратная причинность.

Обратная причинность означает, что:

— **Причина и следствие могут меняться местами.** А влияет на Б, но Б также влияет на А.

— **Возникают причинные петли.** Изменение распространяется по кругу, возвращаясь к источнику.

— **Петли могут быть усиливающими или балансирующими.** Они могут ускорять изменения или стабилизировать систему.

Пример: доверие и сотрудничество. Доверие способствует сотрудничеству. Сотрудничество укрепляет доверие. Причина и следствие меняются местами, создавая петлю. В этой петле трудно сказать, что было первым.

Обратная причинность создаёт особые вызовы для анализа:

— **Трудно определить начальную причину.** В петле всё влияет на всё.

— **Трудно предсказать результат.** Петли могут создавать нелинейную динамику.

— **Трудно вмешиваться.** Воздействие на один элемент может вернуться через другие.

В сверхсложных системах обратная причинность является обычным явлением. Организации, рынки, экосистемы, социальные системы — все они пронизаны причинными петлями. Поэтому карта причинности должна показывать не только прямые влияния, но и петли.

## 23.5. Причины второго порядка

Не все причины лежат на поверхности. Существуют причины второго порядка — причины причин, или последствия последствий. Они часто более важны для понимания системы, чем поверхностные причины.

Причины второго порядка — это:

— **Структурные причины.** Причины, которые создают условия для других причин. Например, организационная культура — это причина, которая влияет на то, как принимаются решения, а решения влияют на результаты.

— **Причины, действующие с задержкой.** Причины, эффект которых проявляется только спустя время. Например, инвестиции в образование сегодня влияют на экономику через десятилетия.

— **Системные причины.** Причины, которые являются следствием самой структуры системы, а не отдельных событий. Например, институциональные ограничения, которые делают определённое поведение неизбежным.

Пример: выгорание на работе. Поверхностная причина —

перегрузка. Причина второго порядка — организационная культура, которая поощряет работу сверх нормы, создавая условия для перегрузки. Ещё более глубокая причина — структура стимулов, которая делает перегрузку рациональной для сотрудников.

При построении карты причинности важно не останавливаться на поверхностных причинах, а идти вглубь:

— **Задавать вопрос «почему?» несколько раз.** Почему это произошло? А почему это произошло? Пока не дойдём до структурных причин.

— **Искать системные условия.** Какие условия делают эту причину возможной или неизбежной?

— **Анализировать историю.** Как система стала такой, что эта причина стала значимой?

В сверхсложных системах причины второго порядка часто являются ключевыми рычагами воздействия. Изменение поверхностной причины даёт временный эффект. Изменение причины второго порядка — структурное изменение системы.

## 23.6. Условия возникновения эффекта

Причина — это не всё. Часто важен не только фактор, но и условия, при которых он действует. Один и тот же фактор может давать разные результаты в разных условиях.

Различие между причиной и условием:

— **Причина** — это фактор, который запускает механизм.

— **Условие** — это контекст, в котором причина становится эффективной.

Пример: обучение. Причина — чтение книг. Условие — активное осмысление прочитанного. Без условия чтение может не давать результата. Тот же фактор (чтение) даёт разные результаты в разных условиях (пассивное vs активное чтение).

При анализе причинности важно учитывать:

— **Необходимые условия.** Факторы, без которых причина не может сработать.

— **Достаточные условия.** Факторы, которые делают причину эффективной.

— **Контекстуальные условия.** Факторы, которые влияют на силу или направление причинного эффекта.

В сверхсложных системах условия часто более важны, чем причины. Изменение условий может изменить действие причины, не меняя саму причину. Поэтому карта причинности должна включать не только причины, но и условия их действия.

## 23.7. Причинная карта как рабочая гипотеза

Важно понимать: причинная карта — это не окончательная истина. Это рабочая гипотеза, которая должна прове-

ряться, уточняться и пересматриваться.

Причинная карта как рабочая гипотеза означает, что:

— **Она основана на текущем понимании.** Мы строим лучшую карту на основе того, что знаем сейчас.

— **Она проверяема.** Мы можем тестировать причинные гипотезы на данных, на моделях, на опыте.

— **Она изменяема.** При появлении новых данных или нового понимания мы пересматриваем карту.

— **Она контекстуальна.** Карта, работающая в одном контексте, может не работать в другом.

Пример: карта причинности для организационного роста. Мы можем построить гипотезу: инвестиции в обучение → рост компетенций → рост производительности → рост прибыли. Но если рынок меняется, эта цепочка может нарушиться. Карта должна обновляться.

При использовании причинной карты как рабочей гипотезы важно:

— **Фиксировать альтернативные гипотезы.** Какие ещё объяснения возможны?

— **Проверять границы применимости.** При каких условиях карта работает, а при каких — нет?

— **Быть готовым к пересмотру.** Если данные противоречат карте, мы меняем карту, а не игнорируем данные.

В сверхсложных системах причинные карты всегда неполны и вероятностны. Это не недостаток, а свойство. Задача системного мышления — не найти единственную правиль-

ную причинную карту, а построить достаточно хорошую карту, которая позволяет принимать решения, и быть готовым её пересматривать.

## **23.8. Практический протокол для построения карты причинности**

Ниже представлен практический протокол построения карты причинности — пошаговая процедура, позволяющая перейти от описания системы к объяснению её поведения через выявление причинных механизмов.

Протокол предназначен для практического применения. Он включает последовательность шагов, конкретные вопросы, методы сбора данных и инструменты анализа.

### **Шаг 1. Определение фокуса анализа**

**Что делаем:** определяем, какое именно поведение системы мы хотим объяснить. Без чёткого фокуса карта причинности становится бесконечной и теряет практическую ценность.

#### **Вопросы:**

- Какое конкретное явление или поведение системы мы хотим объяснить?
- Каковы его границы во времени и пространстве?
- Какие аспекты этого поведения являются наиболее важными для нашего исследования?

— Какие вопросы требуют ответа в первую очередь?

**Практический совет:** сформулируйте объясняемое явление в виде одного предложения. Например: «Почему в компании растёт текучесть кадров?» или «Почему рынок демонстрирует циклические колебания?».

**Результат:** чёткая формулировка феномена, который требует причинного объяснения.

## **Шаг 2. Сбор фактов и наблюдений**

**Что делаем:** собираем все доступные данные о наблюдаемом явлении, не делая преждевременных выводов о причинах.

### **Источники данных:**

- Временные ряды (как менялось явление во времени).
- Сравнительные данные (как явление проявляется в разных контекстах).
- Экспертные наблюдения (что говорят участники и наблюдатели).
- Анализ документов (отчёты, протоколы, исследования).

### **Вопросы для сбора:**

- Что именно происходит? (Описание явления.)
- Когда это происходит? (Временной паттерн.)
- Где это происходит? (Пространственный паттерн.)
- При каких условиях это происходит?

— Что происходит одновременно или непосредственно перед этим?

**Практический совет:** на этом этапе не делайте предположений о причинах. Собирайте факты нейтрально, без интерпретации.

**Результат:** систематизированное описание наблюдаемого явления и его контекста.

### **Шаг 3. Выявление потенциальных причин**

**Что делаем:** генерируем список всех факторов, которые могут влиять на наблюдаемое явление. На этом этапе важно не фильтровать и не оценивать — просто собрать все возможные гипотезы.

#### **Методы генерации:**

— **Мозговой штурм.** Собрать группу экспертов и сгенерировать все возможные причины без критики.

— **Анализ временной последовательности.** Что происходит до наблюдаемого явления?

— **Анализ корреляций.** Какие переменные изменяются вместе с явлением?

— **Анализ литературы.** Какие причины выделяются в исследованиях аналогичных систем?

— **Интервью с участниками.** Что, по их мнению, является причинами?

#### **Вопросы для генерации:**

— Какие факторы изменяются до или одновременно с яв-

лением?

— Какие внутренние факторы системы могут влиять на явление?

— Какие внешние факторы (контекст) могут влиять на явление?

— Какие структурные факторы (институты, нормы, правила) могут влиять?

— Какие поведенческие факторы (решения, стратегии, привычки) могут влиять?

**Практический совет:** используйте технику «пять почему»: для каждого предположения спрашивайте «почему?» несколько раз, чтобы выйти на более глубокие причины.

**Результат:** полный список потенциальных причин (гипотезы).

## **Шаг 4. Проверка причинных гипотез**

**Что делаем:** проверяем каждую гипотезу на соответствие критериям причинности. Это позволяет отсеять корреляции, случайные совпадения и ложные причины.

### **Критерии причинности:**

— **Временная последовательность.** Причина должна предшествовать следствию во времени. Если изменение фактора происходит после изменения явления, он не может быть его причиной.

— **Механизм.** Должен существовать правдоподобный механизм, через который причина влияет на следствие. Без

механизма причинность остаётся гипотетической.

— **Исключение альтернатив.** Мы должны исключить возможность того, что связь является результатом третьего фактора, влияющего на оба явления.

— **Консистентность.** Связь должна наблюдаться в разных условиях и при разных измерениях. Если связь проявляется только в одном контексте, это может быть случайностью.

— **Устойчивость.** Изменение причины должно приводить к предсказуемому изменению следствия (если это возможно проверить экспериментально или на данных).

### **Вопросы для проверки:**

— Действительно ли этот фактор появляется до явления?

— Каков механизм влияния?

— Не может ли эта связь быть следствием третьего фактора?

— Проявляется ли эта связь в разных условиях?

— Можно ли проверить влияние экспериментально (на данных или модели)?

**Практический совет:** для каждой гипотезы оцените, насколько она удовлетворяет каждому критерию. Отметьте гипотезы, которые не проходят проверку.

**Результат:** список причинных гипотез, прошедших первичную проверку, и список гипотез, которые были исключены.

## Шаг 5. Выявление причинных цепочек

**Что делаем:** для каждой подтверждённой причины строим цепочку влияний — как причина (А) приводит к следствию (Г) через промежуточные звенья (Б, В).

### Процедура:

- Возьмите одну причину и одно следствие.
- Спросите: как именно А влияет на Г? Через какие промежуточные звенья?
- Добавляйте звенья, пока цепочка не станет полной ( $A \rightarrow B \rightarrow V \rightarrow G$ ).
- Проверьте каждое звено: действительно ли А влияет на Б? Б влияет на В?

### Вопросы для построения:

- Что происходит между А и Г?
- Какие процессы передают влияние от А к Г?
- Есть ли промежуточные переменные, которые опосредуют связь?
- Есть ли задержки между звеньями?

**Практический совет:** ищите не только прямые, но и опосредованные связи. Часто промежуточные звенья являются ключевыми для понимания механизма и для поиска рычагов воздействия.

**Результат:** цепочки причинности для каждой значимой причины.

## Шаг 6. Анализ обратной причинности

**Что делаем:** проверяем, не является ли причинность циклической — не влияет ли следствие обратно на причину, создавая петлю.

**Вопросы:**

— Может ли изменение следствия (Г) влиять на причину (А)?

— Существует ли петля:  $A \rightarrow B \rightarrow V \rightarrow \Gamma \rightarrow A$ ?

— Является ли эта петля усиливающей или балансирующей?

**Признаки обратной причинности:**

— Переменные изменяются вместе, но трудно сказать, что является причиной, а что следствием.

— Система демонстрирует циклическое поведение, в котором фазы сменяют друг друга.

— Вмешательство в один элемент системы приводит к неожиданным эффектам в других элементах.

**Практический совет:** если вы обнаружили обратную причинность, перейдите от причинной цепочки к диаграмме обратных связей. Это будет более адекватным представлением системы.

**Результат:** выявленные причинные петли.

## **Шаг 7. Выявление причин второго порядка**

**Что делаем:** идём глубже — ищем причины причин. Не останавливаемся на первых уровнях объяснения, а выявляем структурные и системные причины.

## **Метод «пять почему»:**

— Почему А влияет на Б? (Причина 1-го порядка.)

— Почему существует эта причина? (Причина 2-го порядка.)

— Почему существует эта причина? (Причина 3-го порядка.)

— И так далее, пока не дойдём до структурных или системных причин.

## **Вопросы для выявления:**

— Что создаёт условия, при которых эта причина действует?

— Какие структурные факторы делают эту причину значимой?

— Какие институты, нормы, правила поддерживают эту причину?

— Какие исторические факторы привели к возникновению этой причины?

**Практический совет:** причины второго порядка часто более устойчивы и труднее поддаются изменению, но именно они являются истинными рычагами воздействия.

**Результат:** многоуровневая структура причинности (причины первого, второго и более высоких порядков).

## **Шаг 8. Различение причин и условий**

**Что делаем:** для каждой причины определяем, является ли она непосредственным триггером, или она действует

только при определённых условиях.

### **Вопросы:**

— Является ли этот фактор достаточным для возникновения следствия?

— Или он действует только в сочетании с другими факторами?

— Какие условия необходимы для того, чтобы причина сработала?

— Какие условия усиливают или ослабляют действие причины?

### **Типы факторов:**

— **Триггер.** Непосредственно запускает процесс.

— **Условие.** Создаёт возможность, но не запускает процесс сам по себе.

— **Модератор.** Усиливает или ослабляет действие причины.

— **Посредник.** Передаёт влияние от причины к следствию.

**Практический совет:** не путайте условия с причинами. Изменение условия может изменить силу причины, но не устранить её.

**Результат:** классификация факторов по их роли в причинном механизме.

## **Шаг 9. Визуализация карты причинности**

**Что делаем:** строим графическое представление при-

чинных связей и их иерархии.

### **Правила визуализации:**

- Причины изображаются в виде узлов.
- Причинные влияния — в виде направленных стрелок.
- Цепочки показываются как последовательность стрелок.
- Петли — как замкнутые контуры.
- Причины второго порядка — отдельно, с указанием уровней.
- Условия — пунктирными линиями или особыми символами.

### **Инструменты:**

- Ручная отрисовка (для простых карт).
- Программное обеспечение: Vensim, iThink, Kumu, Miro, Lucidchart.

**Практический совет:** начните с простой карты, затем добавляйте слои сложности. Визуализируйте разные уровни причинности отдельно.

**Результат:** визуальная карта причинности.

## **Шаг 10. Формулировка альтернативных гипотез**

**Что делаем:** сознательно формулируем альтернативные объяснения того же явления. Это защищает от преждевременного принятия одной модели.

### **Вопросы:**

- Как иначе можно объяснить это явление?

— Какие другие механизмы могли бы привести к тому же результату?

— Какие данные противоречат нашей текущей гипотезе?

— Какие данные поддержали бы альтернативную гипотезу?

**Практический совет:** альтернативные гипотезы должны быть конкретными и проверяемыми, а не абстрактными «а может быть, что-то ещё».

**Результат:** список альтернативных причинных гипотез.

## Шаг 11. Проверка границ применимости

**Что делаем:** определяем, в каких условиях карта причинности работает, а в каких перестаёт быть адекватной.

### Вопросы:

— При каких условиях эта причинная карта справедлива?

— При каких условиях она перестаёт работать?

— Какие изменения контекста могут сделать её неадекватной?

— Какие изменения структуры системы могут нарушить причинные связи?

**Практический совет:** границы применимости — это не недостаток, а необходимое свойство любой модели. Чёткое определение границ делает модель более надёжной.

**Результат:** описание границ применимости карты причинности.

## **Шаг 12. Итеративное уточнение**

**Что делаем:** карта причинности — это живой документ. Она должна обновляться по мере поступления новых данных и углубления понимания.

### **Процедура:**

— Сравнивайте прогнозы, сделанные на основе карты, с реальными событиями.

— При обнаружении расхождений проверяйте, не изменились ли причинные связи.

— Добавляйте новые факторы, которые ранее были упущены.

— Уточняйте силу и направление связей.

### **Вопросы для пересмотра:**

— Есть ли новые данные, которые требуют пересмотра карты?

— Изменилась ли система так, что прежние причинные связи ослабли или усилились?

— Не появились ли новые причины, которые ранее не были значимы?

— Не стали ли прежние причины второстепенными?

**Практический совет:** установите периодичность пересмотра карты (например, раз в год или при значительных изменениях в системе).

**Результат:** актуальная, обновляемая карта причинности.

## **Связь с другими инструментами**

Карта причинности является входом для:

- **Диаграммы обратных связей** — причинные цепочки замыкаются в петли, создавая динамику.
- **Системной динамики** — причинные связи формализуются в виде уравнений потоков и запасов.
- **Анализа рычагов** — причины второго порядка и структурные причины являются точками воздействия.
- **Сценарного анализа** — понимание причинных механизмов позволяет прогнозировать, как система отреагирует на изменения.

## Итоговый результат

Карта причинности даёт:

- **Понимание механизмов.** Что именно вызывает наблюдаемое поведение и через какие процессы.
  - **Выявление структурных причин.** Какие глубинные факторы создают условия для поверхностных причин.
  - **Различие причин и условий.** Что является непосредственным триггером, а что — контекстом его действия.
  - **Альтернативные объяснения.** Какие другие механизмы могли бы привести к тому же результату.
  - **Границы применимости.** При каких условиях карта работает, а при каких — нет.
  - **Основа для моделирования.** Понимание причинных связей для построения формальных моделей.
- Карта причинности не является окончательной истиной.

Это рабочая гипотеза, которая должна проверяться, уточняться и пересматриваться по мере накопления знаний. Её ценность — не в абсолютной точности, а в способности направлять мышление, выявлять пробелы и формулировать проверяемые предположения.

## Итог главы

Карта причинности — это переход от описания системы к объяснению её поведения. Она показывает, какие механизмы порождают наблюдаемые эффекты, какие факторы являются причинами, а какие — условиями или триггерами.

Мы разобрали, как перейти от корреляции к причинной гипотезе, требуя анализа временной последовательности, механизмов, альтернативных объяснений и проверки в разных условиях. Рассмотрели причинные цепочки — последовательное распространение воздействия через систему — и показали, что в сверхсложных системах они редко бывают линейными.

Мы обсудили множественную причинность — когда результат является следствием нескольких факторов, действующих одновременно и взаимодействующих друг с другом. И обратную причинность — когда результат влияет на исходную причину, создавая причинные петли.

Особое внимание мы уделили причинам второго порядка — структурным причинам, которые создают условия для

других причин. И различие между причинами и условиями — факторами, запускающими механизмы, и контекстом, в котором они становятся эффективными.

И завершили мы утверждением, что причинная карта всегда является рабочей гипотезой, а не окончательной истиной. Она должна проверяться, уточняться и пересматриваться по мере поступления новой информации. В сверхсложных системах причинные карты всегда неполны и вероятностны — и это не недостаток, а свойство.

Теперь, когда мы понимаем причинные механизмы системы, мы готовы к следующему шагу — к диаграммам обратных связей. Мы переходим от причинных цепочек к причинным петлям, от линейной причинности к циклической. Именно обратные связи превращают причины в следствия, а следствия — в новые причины, создавая сложную динамику сверхсложных систем.

## Глава 24. Диаграммы обратных связей

Мы построили карту системы, карту отношений и карту причинности. Мы научились видеть элементы, связи, структуру взаимодействий и причинные механизмы. Но остаётся ключевой вопрос: *как причины и следствия замыкаются в петли, создавая самоподдерживающуюся динамику?*

Диаграммы обратных связей — это следующий уровень глубины. Они показывают не просто причинные цепочки, а причинные петли — контуры, в которых последствия воздействия возвращаются к своему источнику, создавая усиление или самостабилизацию. Именно через обратные связи система обретает способность к самовоспроизводству, росту, адаптации и, иногда, к разрушению.

В сверхсложных системах поведение определяется не отдельными причинами и даже не их цепочками, а конфигурацией петель. Организация, которая растёт, потому что успех привлекает ресурсы, которые усиливают успех. Рынок, который колеблется, потому что ожидания инвесторов создают петли, которые либо подтверждаются, либо разрушаются. Экосистема, которая сохраняет равновесие благодаря балансирующим петлям, пока внешние воздействия не нарушают их.

В этой главе мы разберём, как перейти от причинных

цепочек к причинным петлям, как работают усиливающие и балансирующие петли, как они конкурируют и взаимодействуют, как задержки модифицируют действие обратных связей, как выявлять доминирующую петлю и как строить диаграммы обратных связей на практике.

## **24.1. От причинной цепочки к причинной петле**

Причинная цепочка — это линейная последовательность: А влияет на Б, Б влияет на В, В влияет на Г. В сверхсложных системах этого недостаточно, потому что воздействие редко заканчивается на конечном звене. Оно возвращается к исходному элементу, создавая замкнутый контур.

Причинная петля возникает, когда:

- Существует цепочка влияний от А к Б, от Б к В, и так далее.
- Одно из звеньев этой цепочки влияет обратно на А, замыкая контур.
- Изменения начинают циркулировать по петле, усиливая или ослабляя себя.

Пример: в организации текучесть кадров. Высокая текучесть → потеря опыта → снижение качества работы → снижение удовлетворённости клиентов → снижение прибыли → сокращение бюджета на обучение → снижение удовлетворённости сотрудников → ещё более высокая текучесть. Це-

почка замыкается в петлю. Причина (текущее) становится следствием (через цепочку влияний), и петля продолжает воспроизводиться.

Переход от цепочки к петле меняет характер анализа:

— Мы перестаём искать «первопричину». В петле нет начала и конца — всё влияет на всё.

— Мы начинаем искать структуру контуров. Какие петли существуют в системе? Как они связаны?

— Мы перестаём ожидать линейных реакций. В петле изменение может вернуться и усилить или ослабить себя.

В сверхсложных системах петли являются основным механизмом, порождающим поведение. Поэтому диаграммы обратных связей становятся центральным инструментом анализа.

## 24.2. Усиливающие петли

Усиливающая петля (положительная обратная связь) — это контур, в котором изменение одного элемента приводит к изменению другого в том же направлении, что усиливает исходное изменение. Усиливающие петли создают рост, кумулятивные эффекты, снежный ком.

В усиливающей петле:

— Изменение в одном элементе передаётся по цепочке.

— Каждое звено усиливает эффект, а не ослабляет.

— Изменение возвращается к исходному элементу, уси-

ливая его.

— Процесс ускоряется, пока не столкнётся с ограничением или не перейдёт в другой режим.

Пример: бизнес-рост. Успех компании → привлечение клиентов → увеличение прибыли → инвестиции в развитие → улучшение продукта → привлечение новых клиентов → новый успех. Петля усиливает себя. Компания растёт экспоненциально.

Пример: сетевой эффект. Чем больше пользователей у платформы, тем более ценной она становится для каждого нового пользователя. Рост пользователей → рост ценности → привлечение новых пользователей → дальнейший рост. Усиливающая петля.

В сверхсложных системах усиливающие петли часто являются источниками как взрывного роста, так и катастрофического краха. Они делают систему нестабильной и чувствительной к начальным условиям. Поэтому они требуют особого внимания: малые изменения могут запустить петлю, которая ускорится до критической точки.

## 24.3. Балансирующие петли

Балансирующая петля (отрицательная обратная связь) — это контур, в котором изменение одного элемента приводит к изменению другого в противоположном направлении, что компенсирует исходное изменение. Балансирующие пет-

ли создают устойчивость, гомеостаз, сопротивление изменениям.

В балансирующей петле:

— Изменение в одном элементе вызывает реакцию, направленную в противоположную сторону.

— Эта реакция передаётся по цепочке.

— Она возвращается к исходному элементу, противодействуя его изменению.

— Система удерживается в определённых границах.

Пример: регулирование запасов. Рост продаж → сокращение запасов → дефицит → повышение цен → снижение спроса → восстановление запасов. Петля удерживает запасы в определённом диапазоне.

Пример: организационная стабильность. Рост нагрузки → снижение качества → рост ошибок → увеличение контроля → снижение темпа работы → снижение нагрузки. Петля стабилизирует нагрузку.

В сверхсложных системах балансирующие петли часто являются причиной инерции. Они сохраняют существующее состояние, не позволяя системе меняться, даже когда это необходимо. Поэтому понимание балансирующих петель важно для диагностики устойчивости и управления изменениями.

## 24.4. Комбинации петель

В сверхсложных системах одновременно действуют множество усиливающих и балансирующих петель. Они взаимодействуют, конкурируют и сменяют друг друга. Поведение системы определяется тем, какая петля доминирует в данный момент.

Типичные сценарии комбинаций петель:

— **Рост с ограничением.** Усиливающая петля создаёт рост, но по мере роста активизируется балансирующая петля, которая замедляет или останавливает его. Пример: рост популяции до предела ресурсов.

— **Циклические колебания.** Усиливающие и балансирующие петли сменяют друг друга, создавая циклы. Пример: экономические циклы, где рост сменяется спадом и наоборот.

— **Точки перелома.** Конкуренция петель достигает критической точки, после которой доминирующая петля меняется, и система переходит в новый режим. Пример: экосистема, которая долго сохраняет равновесие, а затем резко переходит в новое состояние.

Пример: управление проектом. Усиливающая петля: успех → мотивация → больше усилий → ещё больший успех. Балансирующая петля: усталость → снижение качества → задержки → стресс → дальнейшее снижение качества. Конку-

ренция между петлями определяет, выгорит ли команда или успешно завершит проект.

В сверхсложных системах анализ конкурирующих петель — ключевая задача. Мы должны уметь идентифицировать, какая петля в данный момент определяет поведение системы, и предвидеть, когда доминирование может смениться.

## 24.5. Задержки в обратных связях

Временные задержки критически влияют на действие обратных связей. Когда причина и следствие разделены во времени, петли ведут себя иначе, чем при мгновенной реакции.

Задержки в обратных связях создают:

— **Колебания.** Система реагирует на прошлое состояние, которое уже изменилось, создавая циклы перерегулирования.

— **Отложенные эффекты.** Воздействие проявляется только спустя время, и система не получает обратной связи, когда она могла бы её использовать.

— **Накопление.** Изменения накапливаются, и когда обратная связь наконец приходит, она может быть слишком сильной.

Пример: управление цепочками поставок. Производитель получает информацию о спросе с задержкой. Он увеличивает производство, когда спрос уже начал падать, создавая избыток запасов. Это приводит к колебаниям, которые могут

быть значительно больше, чем колебания спроса.

Пример: организационные изменения. Руководство внедряет изменение, но обратная связь от сотрудников приходит с задержкой. К тому времени проблема может обостриться, и ответная реакция может быть избыточной.

При построении диаграмм обратных связей важно учитывать задержки. Они могут быть указаны на диаграмме специальными символами или отмечены в комментариях. Без учёта задержек диаграмма может давать неверное представление о динамике системы.

## 24.6. Выявление доминирующей петли

В любой системе действует множество петель. Но не все они одинаково важны. Обычно есть одна-две петли, которые в данный момент определяют поведение системы. Это доминирующая петля.

Выявление доминирующей петли требует:

— **Построения диаграммы всех значимых петель.**

Мы должны идентифицировать все петли, которые могут влиять на поведение системы.

— **Анализа динамики.** Какая петля в текущий момент оказывает наибольшее влияние на поведение системы?

— **Идентификации рычагов.** Какие механизмы могут изменить доминирование петель?

Пример: организация в кризисе. В нормальном режиме

доминируют балансирующие петли, поддерживающие стабильность. В кризисе балансирующие петли ослабевают, и доминировать начинает усиливающая петля паники: падение продаж → сокращение бюджета → снижение качества → дальнейшее падение продаж.

Поиск доминирующей петли — это путь к системному рычагу. Вместо того чтобы бороться с симптомами, мы изменяем петлю, которая эти симптомы порождает. Это требует глубокого понимания системы, но даёт наибольший эффект при минимальных усилиях.

## 24.7. Практика построения диаграммы обратных связей

Диаграмма обратных связей (loop diagram) — это визуальный инструмент, который показывает переменные, их связи, полярность связей (усиливающая или ослабляющая) и петли, которые они образуют.

Протокол построения:

**Шаг 1. Определение переменных.** Выберите ключевые переменные, которые характеризуют состояние системы. Это должны быть измеримые или наблюдаемые величины. Не используйте абстрактные понятия без операционализации.

**Шаг 2. Определение направлений влияния.** Для каждой пары переменных определите, влияет ли изменение од-

ной на изменение другой. Проведите стрелку от влияющей к зависимой переменной.

**Шаг 3. Определение полярности связи.** Определите, является ли связь усиливающей (изменение в одном направлении вызывает изменение в том же направлении) или ослабляющей (изменение в одном направлении вызывает изменение в противоположном). Обозначьте полярность знаком «+» или «—» на стрелке.

**Шаг 4. Выявление петель.** Проследите, где стрелки замыкаются в контуры. Каждая замкнутая цепочка — это петля.

**Шаг 5. Определение типа петли.** Для каждой петли подсчитайте количество ослабляющих связей. Если их чётное число (или ноль), петля усиливающая. Если нечётное — балансирующая.

**Шаг 6. Анализ динамики.** Что произойдёт, если какая-то переменная изменится? Как поведёт себя петля? Будет ли она усиливать или ослаблять изменение?

**Шаг 7. Выявление доминирующей петли.** Какая петля в текущий момент определяет поведение системы? Что изменится, если доминирование сместится?

Пример: простая диаграмма для организации.

Успех (+) → Инвестиции (+)

↑ ↓

Прибыль (+) ← Качество (+)

Это усиливающая петля: успех → инвестиции → качество

→ прибыль → успех. Каждая связь усиливает следующую, петля самоусиливается.

Важно: диаграмма — это всегда упрощение. Она не показывает всего богатства системы, но выделяет ключевые петли, которые определяют поведение. Поэтому диаграмма должна быть достаточно простой, чтобы быть понятной, и достаточно сложной, чтобы быть полезной.

## Итог главы

Диаграммы обратных связей — это переход от причинных цепочек к причинным петлям, от линейного мышления к циклическому. Они показывают, как причины и следствия замыкаются в контуры, создавая самоподдерживающуюся динамику.

Мы разобрали, как перейти от причинных цепочек к причинным петлям, как работают усиливающие и балансирующие петли. Усиливающие петли создают рост и нестабильность. Балансирующие петли создают устойчивость и сопротивление изменениям. Их конкуренция определяет поведение системы: рост с ограничением, циклические колебания или точки перелома.

Особое внимание мы уделили задержкам в обратных связях — временным разрывам между причиной и следствием, которые могут превращать простые петли в сложные колебательные процессы. И выявлению доминирующей петли —

определению того, какая петля в данный момент определяет поведение системы, и как это знание становится путём к системному рычагу.

Мы завершили практическим протоколом построения диаграмм обратных связей: от определения переменных и направлений влияния до выявления петель, определения их типа и анализа динамики. И подчеркнули, что диаграмма — это всегда упрощение, но упрощение полезное, которое позволяет увидеть ключевые механизмы, определяющие поведение системы.

Теперь, когда мы понимаем структуру обратных связей в системе, мы готовы к следующему шагу — к системной динамике, которая превращает качественные диаграммы в количественные модели поведения системы во времени. Мы переходим от того, *как устроены петли*, к тому, *как они меняются и как это меняет систему*.

## Глава 25. Системная динамика

Мы построили карту системы, карту отношений, карту причинности и диаграммы обратных связей. Мы научились видеть структуру системы и понимать, какие петли определяют её поведение. Но остаётся вопрос: *как система ведёт себя во времени?* Как меняются переменные, как взаимодействуют потоки и накопления, как задержки и обратные связи создают конкретную траекторию развития?

Системная динамика — это следующий уровень анализа. Она превращает качественные диаграммы обратных связей в количественные модели, показывающие, как система изменяется во времени. Она позволяет ответить на вопрос «что произойдёт, если...?» через компьютерное моделирование. Она выявляет неочевидные последствия решений, показывает, как одни и те же структуры могут порождать разные режимы поведения, и помогает находить устойчивые стратегии в условиях неопределённости.

В сверхсложных системах системная динамика становится незаменимым инструментом. Здесь поведение не является линейным, задержки искажают причинно-следственные связи, обратные связи создают петли, которые невозможно предсказать интуитивно. Системная динамика позволяет перейти от интуитивных догадок к формальным моделям, которые можно тестировать, уточнять и использовать для при-

нения решений.

В этой главе мы разберём, как система представляется в виде динамической модели, как работают запасы и потоки, как обратные связи встраиваются в динамические модели, как моделируются задержки, как проводится сценарное моделирование, как калибровать и проверять модели и каковы пределы системно-динамического моделирования.

## 25.1. Система как динамическая модель

Статическая модель показывает систему в один момент времени. Динамическая модель показывает, как система изменяется во времени. Переход от статической к динамической модели — это переход от карты к фильму.

Системная динамика как методология была разработана Джейм Форрестером в 1950-х годах для моделирования сложных социальных и экономических систем. Её ключевая идея: поведение системы определяется не внешними событиями, а внутренней структурой — конфигурацией потоков, накоплений и обратных связей.

Динамическая модель включает:

— **Переменные состояния** (запасы, накопления) — то, что накапливается в системе и определяет её текущее состояние.

— **Переменные потока** — то, что изменяет запасы, входя в систему или выходя из неё.

— **Вспомогательные переменные** — промежуточные расчёты, связывающие потоки с другими переменными.

— **Обратные связи** — контуры, через которые изменения в системе влияют на сами потоки.

Динамическая модель позволяет:

— **Моделировать поведение системы во времени.** Мы можем увидеть, как система реагирует на изменения параметров.

— **Выявлять неочевидные последствия.** Мы можем увидеть эффекты второго и третьего порядка, которые не видны при поверхностном анализе.

— **Тестировать гипотезы.** Мы можем проверить, как изменение структуры или параметров влияет на поведение системы.

В сверхсложных системах динамическое моделирование часто является единственным способом понять долгосрочное поведение. Интуиция не справляется с множеством обратных связей и задержек, которые определяют динамику.

## 25.2. Запасы и потоки

Центральное понятие системной динамики — различие между запасами и потоками. Это различие часто упускается в повседневном мышлении, но оно критически важно для понимания динамики.

**Запас (stock)** — это накопление, количество чего-либо в

системе в данный момент времени. Запасы создают инерцию и память системы. Они изменяются медленно, через потоки. Примеры запасов: население, капитал, знания, уровень воды в резервуаре, задолженность, доверие.

**Поток (flow)** — это скорость изменения запаса, то, что входит в запас или выходит из него. Потоки изменяют запасы. Примеры потоков: рождаемость и смертность (изменяют население), инвестиции и амортизация (изменяют капитал), обучение и забывание (изменяют знания).

Важнейшее правило системной динамики: запас определяет поток, но поток определяет изменение запаса. Это означает, что состояние системы (запасы) определяет, какие потоки возможны, а потоки, в свою очередь, изменяют состояние системы.

Пример: человеческий капитал. Запас — это уровень знаний и навыков человека. Потоки — обучение (приток знаний) и забывание (отток знаний). Текущий уровень знаний определяет, насколько быстро человек может учиться новому (запас влияет на поток). Но обучение меняет уровень знаний (поток влияет на запас). Возникает петля.

Понимание различия между запасами и потоками критически важно для анализа динамики. Смешение запасов и потоков — одна из самых распространённых ошибок, приводящих к неверным выводам.

## 25.3. Обратные связи в динамической модели

Диаграмма обратных связей показывает структуру петель. Динамическая модель превращает эту структуру в количественную модель, где петли работают через запасы и потоки.

Обратные связи в динамической модели:

— **Усиливающие петли.** В них увеличение запаса ведёт к увеличению потока, который ещё больше увеличивает запас. Например, рост населения ведёт к росту рождаемости, что ещё больше увеличивает население.

— **Балансирующие петли.** В них увеличение запаса ведёт к уменьшению потока, который снижает запас. Например, рост населения ведёт к росту смертности из-за нехватки ресурсов, что снижает население.

Динамическая модель позволяет количественно оценить, как взаимодействие петель создаёт конкретный паттерн поведения — рост, стабилизацию, колебания, спад.

Пример: модель рынка. Запас — это товар на складе. Потоки — производство (приток) и продажи (отток). Продажи зависят от наличия товара. Если товар есть, продажи растут, что снижает запас. Снижение запаса стимулирует производство, которое восполняет запас. Возникает балансирующая петля, удерживающая запас в определённых границах. Но если производство имеет задержку, возникают колебания

запасов.

## 25.4. Задержки

Задержки — один из самых важных элементов в системной динамике. Они вносят время в систему, создавая колебания и отложенные эффекты.

Задержки могут быть:

— **Материальными** — время на производство, доставку, строительство.

— **Информационными** — время на сбор данных, анализ, принятие решений.

— **Поведенческими** — время на изменение привычек, адаптацию, обучение.

В динамической модели задержки моделируются через промежуточные запасы. Например, заказ на поставку создаёт запас заказов, который затем превращается в поставки. Это создаёт задержку между решением и его реализацией.

Задержки создают:

— **Колебания.** Система «перескакивает» через равновесие, потому что реакция приходит с опозданием.

— **Перерегулирование.** Усилия, приложенные к решению проблемы, оказываются избыточными, потому что система уже начала восстанавливаться.

— **Накопление.** Проблемы накапливаются, потому что обратная связь приходит слишком поздно.

Пример: управление проектом. Решение о найме новых сотрудников принимается на основе текущей загрузки. Но найм и обучение занимают время. К тому времени, когда новые сотрудники начинают работать, нагрузка может уже измениться. Это создаёт колебания в численности и загрузке команды.

При построении динамических моделей задержки должны быть явно учтены. Их игнорирование — одна из самых частых причин неадекватности моделей.

## 25.5. Сценарное моделирование

Одна из главных ценностей системной динамики — возможность сценарного моделирования. Вместо того чтобы пытаться предсказать единственное будущее, мы можем исследовать, как система поведёт себя при разных предположениях.

Сценарное моделирование включает:

- **Определение базового сценария.** Как система поведёт себя, если всё останется как есть?

- **Изменение параметров.** Что произойдёт, если мы изменим ключевые параметры (скорость роста, задержки, чувствительность)?

- **Изменение структуры.** Что произойдёт, если мы изменим структуру обратных связей (добавим новые петли, удалим старые)?

— **Тестирование устойчивости.** Как система поведёт себя при экстремальных условиях?

Сценарное моделирование позволяет:

— **Обнаруживать риски.** Какие сценарии могут привести к нежелательным результатам?

— **Выявлять возможности.** Какие сценарии открывают новые возможности?

— **Находить устойчивые стратегии.** Какие решения работают при широком диапазоне сценариев?

В сверхсложных системах сценарное моделирование становится особенно важным, потому что здесь будущее принципиально неопределённо. Вместо того чтобы строить один прогноз, мы исследуем пространство возможных траекторий.

## 25.6. Калибровка и проверка модели

Модель — это упрощение реальности. Она должна быть достаточно точной, чтобы быть полезной, но не настолько сложной, чтобы быть непонятной. Калибровка и проверка — это процесс настройки модели и оценки её адекватности.

**Калибровка.** Настройка параметров модели так, чтобы она воспроизводила историческое поведение системы. Это включает:

— Сбор данных о ключевых переменных.

— Оценку параметров (скорости потоков, задержки, чув-

ствительности).

— Сравнение поведения модели с реальными данными.

**Проверка.** Оценка того, насколько модель адекватно отражает реальность. Это включает:

— Проверку структуры — соответствует ли модель нашему пониманию системы.

— Проверку поведения — воспроизводит ли модель наблюдаемую динамику.

— Проверку чувствительности — насколько сильно меняются результаты при небольших изменениях параметров.

— Проверку на экстремальных условиях — как модель ведёт себя за пределами нормального диапазона.

Важно понимать: модель никогда не будет точным отражением реальности. Она всегда будет упрощением. Цель калибровки и проверки — не достичь абсолютной точности, а убедиться, что модель достаточно адекватна для решения поставленной задачи.

## **25.7. Пределы системно-динамического моделирования**

Системная динамика — мощный инструмент, но у неё есть пределы. Их важно понимать, чтобы не переоценивать возможности моделирования.

Основные пределы:

— **Зависимость от структуры модели.** Результаты мо-

дели зависят от того, как мы определили структуру системы. Если мы упустили важные петли, модель будет неадекватной.

— **Ограниченность данных.** Для калибровки модели нужны данные. В сверхсложных системах данные часто неполны или недоступны.

— **Риск ложной точности.** Модель даёт количественные результаты, что может создавать иллюзию точности, даже если предпосылки модели неопределённые.

— **Неспособность моделировать сильную эмерджентность.** Некоторые свойства систем (например, сознание, творчество, смыслы) принципиально не поддаются формальному моделированию.

— **Рефлексивность.** Если модель используется для принятия решений, она может изменить поведение системы, что сделает её неадекватной.

Эти пределы не означают, что системная динамика бесполезна. Они означают, что её нужно использовать с пониманием границ. Модель — это инструмент для исследования, а не замена мышления. Она помогает задавать правильные вопросы, но не даёт окончательных ответов.

## **25.8. Практический протокол построения динамической модели**

Построение системно-динамической модели — это итера-

тивный процесс. Он начинается с качественного понимания системы и постепенно переходит к формальной модели.

## **Шаг 1. Определение границ модели**

Динамическая модель не может включать всё. Необходимо определить, что входит в модель, а что остаётся за её пределами. Границы модели зависят от цели исследования и от того, какие петли мы считаем существенными.

### **Процедура:**

- Чётко сформулировать вопрос, на который должна ответить модель.
- Определить временной горизонт моделирования (сколько времени мы будем моделировать).
- Определить ключевые переменные, которые должны быть в модели.
- Исключить переменные, которые не влияют на исследуемое поведение.

**Пример:** Модель роста стартапа. Вопрос: «Как изменение инвестиций влияет на рост компании в течение 5 лет?». Границы включают: инвестиции, доходы, затраты, команду, клиентов. Исключаются: макроэкономическая среда, технологические тренды, конкуренция (если они не являются ключевыми для данного исследования).

## **Шаг 2. Идентификация запасов и потоков**

Запасы — это то, что накапливается в системе. Потоки — это то, что изменяет запасы. Идентификация запасов и по-

токов — ключевой шаг, потому что именно через них реализуются обратные связи.

### **Процедура:**

— Определить, что в системе накапливается. Это ваши запасы.

— Для каждого запаса определить, что его увеличивает (приток) и что уменьшает (отток).

— Проверить: запас не может измениться мгновенно, он может измениться только через потоки.

### **Типичные ошибки:**

— Смешение запасов и потоков. Например, считать «инвестиции» запасом, хотя это поток.

— Пропуск важных запасов. Например, в модели организации не учитывать «накопленную репутацию».

— Неучёт оттоков. Например, в модели персонала учитывать найм, но не учитывать увольнения.

### **Пример для модели стартапа:**

| Запас             | Приток           | Отток               |
|-------------------|------------------|---------------------|
| Денежные средства | Доходы           | Затраты, инвестиции |
| Клиентская база   | Новые клиенты    | Отток клиентов      |
| Команда           | Найм             | Увольнения          |
| Репутация         | Успешные проекты | Ошибки, кризисы     |

## **Шаг 3. Определение обратных связей**

Обратные связи — это петли, через которые запасы влияют на потоки, а потоки изменяют запасы. В динамической модели каждая обратная связь должна быть формализована в виде функции, связывающей запас с потоком.

### **Процедура:**

— Для каждой петли, выявленной на диаграмме обратных связей, определить, какой запас влияет на какой поток.

— Задать функцию зависимости. Это может быть линейная зависимость, пороговая, с насыщением, с задержкой.

— Записать уравнение: Поток =  $f$  (Запас, другие параметры).

### **Типы функций:**

— **Линейная:** Поток =  $k \times$  Запас (например, доходы = цена  $\times$  клиенты).

— **С насыщением:** Поток стремится к пределу при росте запаса (например, рынок насыщается).

— **Пороговая:** Поток активируется только при достижении запаса определённого уровня.

— **С задержкой:** Поток зависит от запаса в прошлом, а не от текущего значения.

### **Пример для модели стартапа:**

— Усиливающая петля: Клиенты  $\rightarrow$  Доходы  $\rightarrow$  Инвестиции  $\rightarrow$  Рост команды  $\rightarrow$  Качество  $\rightarrow$  Новые клиенты.

— Доходы = клиенты  $\times$  средний чек.

— Инвестиции = доля доходов, направляемая на развитие (например, 30%).

- Рост команды = инвестиции / стоимость найма.
- Качество = функция от размера команды и её опыта.
- Новые клиенты = качество  $\times$  эффективность маркетинга.
- Балансирующая петля: Рост команды  $\rightarrow$  Сложность управления  $\rightarrow$  Снижение эффективности  $\rightarrow$  Замедление роста.
- Сложность управления = функция от размера команды (например, квадратичная зависимость).
- Эффективность =  $1 / \text{сложность управления}$ .
- Новые клиенты = качество  $\times$  эффективность  $\times$  маркетинг (эффективность снижается при росте команды).

## **Шаг 4. Определение задержек**

Задержки вносят время в систему. Они критически влияют на поведение, создавая колебания и отложенные эффекты.

### **Процедура:**

- Для каждого потока определить, есть ли задержка между изменением запаса и изменением потока.
- Задать среднюю длительность задержки.
- Моделировать задержку через промежуточный запас (например, «заказы в обработке»).

### **Типы задержек:**

- **Материальные:** время на производство, доставку,

строительство.

— **Информационные:** время на сбор данных, анализ, принятие решений.

— **Поведенческие:** время на изменение привычек, адаптацию, обучение.

### **Пример для модели стартапа:**

— Задержка найма: решение о найме → поиск → отбор → выход на работу. Средняя задержка — 3 месяца.

— Задержка выхода на рынок: разработка продукта → тестирование → запуск. Задержка — 6 месяцев.

— Задержка реакции клиентов: изменение качества → изменение репутации → изменение числа новых клиентов. Задержка — 1 месяц.

## **Шаг 5. Калибровка модели**

После того как структура модели определена, необходимо задать конкретные значения параметров. Это процесс калибровки.

### **Процедура:**

— Собрать данные по ключевым переменным (запасам и потокам).

— Оценить параметры функций (коэффициенты, пороги, задержки).

— Если данных недостаточно, использовать экспертные оценки.

— Запустить модель и сравнить её поведение с реальными

данными (если они есть).

— Скорректировать параметры для улучшения соответствия.

**Важно:** На этом этапе модель не должна быть «подогнана» под любые данные. Цель — получить разумное соответствие, а не точное воспроизведение прошлого.

## **Шаг 6. Проверка модели**

Модель должна быть проверена на адекватность. Проверка включает несколько уровней.

### **Проверка структуры:**

— Соответствует ли модель нашему пониманию системы?

— Не упущены ли важные петли?

— Не включены ли лишние элементы?

### **Проверка поведения:**

— Воспроизводит ли модель наблюдаемую динамику?

— Дают ли изменения параметров разумные результаты?

— При экстремальных значениях параметров модель ведёт себя правдоподобно?

### **Проверка чувствительности:**

— Как сильно меняются результаты при небольших изменениях параметров?

— Какие параметры являются критическими?

— Можно ли упростить модель, не теряя существенных результатов?

## **Шаг 7. Сценарный анализ**

После проверки модель готова к использованию. Основное применение — сценарный анализ.

### **Процедура:**

- Определить базовый сценарий — текущие параметры, текущая политика.
- Разработать альтернативные сценарии: изменение параметров, структуры, политик.
- Запустить модель для каждого сценария.
- Сравнить траектории развития.
- Выявить, какие сценарии ведут к желательным результатам, а какие — к нежелательным.

### **Примеры сценариев для модели стартапа:**

- Базовый сценарий: текущие параметры.
- Рост инвестиций: увеличение доли доходов на развитие с 30% до 50%.
- Улучшение продукта: снижение оттока клиентов на 20%.
- Задержка найма: ускорение процесса найма с 3 до 2 месяцев.
- Комбинированный: рост инвестиций + улучшение продукта.

Сравнение траекторий показывает, какие политики дают наилучшие результаты в долгосрочной перспективе.

## 25.9. Что даёт динамическая модель

Динамическая модель даёт не просто ответы, а понимание:

— **Как работает система.** Мы видим, как взаимодействие запасов, потоков и обратных связей создаёт конкретное поведение.

— **Какие параметры критичны.** Анализ чувствительности показывает, где небольшие изменения дают большой эффект.

— **Какие политики эффективны.** Мы можем сравнить разные стратегии и выбрать наилучшую.

— **Какие риски существуют.** Сценарный анализ показывает, к чему могут привести экстремальные условия.

Но важно понимать: модель — это не реальность. Это упрощение. Она полезна, если помогает принимать лучшие решения. Она вредна, если создаёт иллюзию точности.

### Итог главы

Системная динамика — это переход от качественных диаграмм обратных связей к количественным моделям поведения системы во времени. Она позволяет моделировать, как запасы и потоки, обратные связи и задержки создают конкретные траектории развития.

Мы разобрали, как система представляется в виде динамической модели с переменными состояниями (запасами), переменными потоками и обратными связями. Обсудили, как моделируются запасы и потоки, как обратные связи встраиваются в динамические модели и как задержки создают колебания и отложенные эффекты.

Особое внимание мы уделили сценарному моделированию — исследованию поведения системы при разных предположениях, которое позволяет выявлять риски, обнаруживать возможности и находить устойчивые стратегии. И процессу калибровки и проверки модели — настройке параметров и оценке адекватности модели.

Мы завершили обсуждением пределов системно-динамического моделирования: зависимости от структуры, ограниченности данных, риска ложной точности, неспособности моделировать сильную эмерджентность и рефлексивности. Эти пределы не обесценивают инструмент, но требуют осознанного использования.

Мы разобрали практический протокол построения динамической модели: определение границ, идентификацию запасов и потоков, формализацию обратных связей, учёт задержек, калибровку, проверку и сценарный анализ. Каждый шаг был проиллюстрирован на примере модели роста стартапа.

Мы увидели, что системная динамика позволяет не просто описывать систему, а моделировать её поведение, выяв-

лять критические параметры, тестировать политики и управлять рисками. Но мы также подчеркнули, что модель — это всегда упрощение, и её использование требует понимания границ и осознанного подхода.

Теперь, когда мы понимаем, как моделировать динамику системы, мы готовы к следующему шагу — к сетевому мышлению. Мы переходим от моделирования потоков и запасов к анализу структуры взаимодействий. Мы увидим, как конфигурация сети определяет, как распространяются изменения и как система реагирует на возмущения.

## Глава 26. Сетевое мышление

Мы построили карту системы, карту отношений, карту причинности, диаграммы обратных связей и динамическую модель. Каждый из этих инструментов дал свой ракурс. Но остаётся вопрос: *как структура взаимодействий определяет поведение системы?* Как распространение информации, влияния, ресурсов и возмущений зависит от того, как устроена сеть связей?

Сетевое мышление — это способ анализа, при котором система рассматривается как сеть взаимодействующих элементов. Оно фокусируется не на свойствах отдельных элементов, а на структуре связей между ними. В сетевой логике поведение системы объясняется не качествами узлов, а их положением в сети, конфигурацией связей и паттернами распространения.

В сверхсложных системах сетевой подход становится незаменимым. Здесь поведение часто определяется не отдельными акторами, а структурой их взаимодействий. Финансовые кризисы распространяются по сетям межбанковских кредитов. Инновации распространяются по сетям профессиональных контактов. Эпидемии — по сетям социальных контактов. Информация — по сетям коммуникаций. Без понимания структуры сети мы не можем понять, как распространяются изменения и где находятся критические точки.

В этой главе мы разберём, как система представляется как сеть, как анализировать степень связанности, что такое центральность и её разные типы, как работают кластеры и сообщества, как распространяются воздействия по сети, как оценивать устойчивость и уязвимость сети и как анализировать динамические сети, которые меняются во времени.

## 26.1. Система как сеть

В сетевом представлении система — это множество узлов (элементов), соединённых рёбрами (связями). Но сеть — это не просто ещё одна схема. Это особый способ видения, при котором поведение системы объясняется не свойствами элементов, а их положением в структуре взаимодействий.

**Узлы** — это элементы системы. Ими могут быть люди, организации, компьютеры, города, документы, идеи — всё, что может быть связано с другим.

**Рёбра** — это связи между узлами. Ими могут быть взаимодействия, потоки, отношения, зависимости, влияния.

Сетевое представление позволяет:

— **Визуализировать структуру.** Увидеть, как устроена система, какие элементы центральны, какие — периферийны.

— **Анализировать распространение.** Понять, как информация, влияние, ресурсы или возмущения движутся по системе.

— **Выявлять уязвимости.** Найти точки, потеря которых может разрушить систему.

— **Обнаруживать скрытые структуры.** Увидеть кластеры, посредников, структурные разрывы.

В сверхсложных системах сетевое представление часто является более адекватным, чем иерархическое. Здесь нет единого центра управления, поведение возникает из распределённых взаимодействий, и структура связей определяет динамику.

## 26.2. Степень связанности

Степень связанности — это мера того, насколько плотно узлы соединены друг с другом. Она показывает, насколько система интегрирована или фрагментирована.

**Плотность сети.** Доля существующих связей от всех возможных. Плотная сеть характеризуется высоким уровнем взаимодействия между узлами. Разреженная — низким.

— **Высокая плотность.** Информация и влияние распространяются быстро. Но сеть может быть избыточной и ригидной.

— **Низкая плотность.** Сеть фрагментирована, распространение медленное. Но сеть может быть более гибкой и адаптивной.

**Связность.** Насколько сеть является единым целым, а не набором изолированных компонентов.

— **Связная сеть.** Между любыми двумя узлами существует путь. Изменения могут достичь любой части системы.

— **Несвязная сеть.** Есть изолированные компоненты. Изменения в одной части не достигают другой.

**Изолированные узлы.** Элементы, не имеющие связей с другими. Они не влияют на систему и не испытывают её влияния. Их наличие может указывать на проблемы интеграции.

**Сверхсвязанные узлы.** Элементы с очень высокой степенью (связанные со многими). Они являются хабами сети, через которые проходит большая часть взаимодействий.

В сверхсложных системах степень связанности редко бывает однородной. Обычно есть области высокой плотности (кластеры) и области низкой плотности (разрывы). Понимание этой неоднородности критически важно для анализа распространения и уязвимости.

## 26.3. Центральность

Центральность — это мера того, насколько узел является важным в сети. Но «важность» может означать разные вещи. В сетевом анализе выделяют несколько типов центральности, каждый из которых показывает разные аспекты значимости узла.

**Степенная центральность.** Количество связей, которые имеет узел. Узел с высокой степенью связан со многими другими. Это «хаб» сети.

— **Что показывает.** Насколько узел активен, насколько он является центром взаимодействий.

— **Когда важна.** Для распространения информации, влияния, ресурсов. Хабы быстрее получают и передают воздействия.

— **Пример.** В организации — руководитель, который взаимодействует со многими сотрудниками. В социальной сети — популярный пользователь с большим числом подписчиков.

**Посредническая центральность.** Степень, в которой узел является посредником между другими узлами. Узел с высокой посреднической центральностью соединяет разные части сети, которые иначе не были бы связаны.

— **Что показывает.** Насколько узел контролирует потоки между разными частями сети.

— **Когда важна.** Для контроля информации, ресурсов, влияния. Посредник может блокировать или перенаправлять потоки.

— **Пример.** В организации — координатор между отделами. В цепочке поставок — дистрибьютор, соединяющий производителей и розницу.

**Центральность близости.** Степень, в которой узел близок ко всем остальным узлам. Узел с высокой близостью может быстро взаимодействовать с любым другим узлом.

— **Что показывает.** Насколько узел находится «в центре» сети, насколько быстро он может достигаться до других.

— **Когда важна.** Для быстрого распространения информации, для координации.

— **Пример.** В организации — сотрудник, который знает всех и может быстро связаться с любым. В сети городов — транспортный хаб.

В сверхсложных системах разные типы центральности могут указывать на разные роли. Один узел может быть хабом (высокая степень), но не посредником (низкая посредническая центральность). Другой — посредником, но не хабом. Анализ всех типов центральности даёт более полное понимание роли каждого элемента.

## 26.4. Кластеры и сообщества

Сети редко бывают однородными. В них обычно выделяются кластеры — группы узлов, тесно связанных друг с другом, но слабо связанных с другими группами. Эти кластеры называют сообществами.

**Кластеры.** Группы узлов с высокой внутренней плотностью связей.

— **Что показывают.** Структуру системы, её подсистемы, специализацию.

— **Когда важны.** Для понимания, как система разделена на функциональные блоки, как в них формируются локальные нормы и практики.

— **Пример.** В организации — отделы, проектные группы.

В социальной сети — группы по интересам.

**Структурные разрывы.** Промежутки между кластерами, через которые связи проходят редко.

— **Что показывают.** Барьеры для распространения, зоны потенциальной изоляции.

— **Когда важны.** Для понимания, почему информация или влияние не достигают некоторых частей системы.

— **Пример.** Между отделами в организации, которые слабо взаимодействуют. Между разными профессиональными сообществами.

**Модульность.** Степень, в которой сеть разделена на кластеры. Высокая модульность означает чёткое разделение на группы. Низкая — более однородную структуру.

В сверхсложных системах кластеры часто возникают спонтанно, через самоорганизацию. Они не планируются, а возникают из локальных взаимодействий. Обнаружение кластеров и структурных разрывов — важная задача сетевого анализа, потому что через них можно понять, как система структурируется и как в ней распространяются изменения.

## 26.5. Распространение по сети

Одна из ключевых задач сетевого мышления — понять, как распространяются изменения по сети: информация, влияние, инновации, ресурсы, возмущения, кризисы.

**Механизмы распространения:**

— **Контакты.** Распространение происходит через непосредственные связи между узлами. Чем больше связей, тем быстрее распространение.

— **Влияние.** Распространение зависит от силы влияния узлов. Хабы и посредники могут ускорять или замедлять распространение.

— **Пороги.** Для распространения может требоваться достижение определённого порога (например, число соседей, которые уже приняли информацию).

— **Каскады.** В некоторых сетях распространение может становиться самоподдерживающимся: один узел влияет на других, те — на следующих, создавая цепную реакцию.

### **Факторы, влияющие на распространение:**

— **Структура сети.** Плотные сети с короткими путями ускоряют распространение. Разреженные с большими разрывами — замедляют.

— **Центральность узлов.** Хабы ускоряют распространение, потому что через них проходит много связей. Посредники могут быть узкими местами.

— **Кластеры.** Внутри кластеров распространение быстрое. Между кластерами — медленное, через структурные разрывы.

— **Начальная точка.** Где начинается распространение, определяет, как быстро оно охватит систему. Начало в хабе даёт более быстрое распространение, чем начало на периферии.

В сверхсложных системах распространение часто бывает нелинейным. Может существовать порог, после которого распространение становится взрывным (как в случае с вирусным контентом или финансовой паникой). Или наоборот: распространение может затухать, не достигая критической массы.

## 26.6. Устойчивость и уязвимость сети

Сетевое мышление позволяет оценить, насколько система устойчива к изменениям — исчезновению элементов или разрыву связей.

**Устойчивость сети.** Способность сети сохранять связность и функциональность при потере узлов или связей.

**Факторы устойчивости:**

— **Избыточность.** Наличие альтернативных путей между узлами. Если один путь блокируется, можно использовать другой.

— **Распределённость.** Отсутствие единых точек отказа. Если критические функции распределены по многим узлам, потеря одного не разрушает систему.

— **Модульность.** Если сеть разделена на кластеры, потеря одного кластера не разрушает всю сеть.

**Уязвимость сети.** Точки, потеря которых может разрушить систему.

— **Критические узлы.** Узлы, без которых сеть распадается.

ется на части. Это могут быть хабы (без которых теряется связность) или посредники (без которых кластеры изолируются).

— **Критические связи.** Связи, разрыв которых изолирует часть сети.

### **Сценарии для анализа уязвимости:**

— Удаление центрального узла (хаба).

— Удаление посредника (моста между кластерами).

— Разрыв критической связи.

— Последовательное удаление нескольких узлов.

В сверхсложных системах уязвимость часто бывает скрытой. Система может казаться устойчивой в нормальном режиме, но иметь скрытые структурные уязвимости, которые проявляются при нагрузке. Поэтому анализ уязвимости — это не разовая процедура, а непрерывное исследование.

## **26.7. Динамические сети**

В сверхсложных системах сети редко бывают статичными. Они меняются во времени: узлы появляются и исчезают, связи возникают и разрываются, структура перестраивается.

**Динамические сети** — это сети, в которых структура меняется во времени.

### **Типы изменений:**

— **Изменение состава узлов.** Новые участники входят

в систему, старые выходят.

— **Изменение связей.** Связи возникают, укрепляются, ослабевают, исчезают.

— **Изменение структуры.** Кластеры формируются и распадаются, центры смещаются, посредники теряют или приобретают влияние.

**Что даёт анализ динамических сетей:**

— **Понимание эволюции.** Как система развивается, какие изменения происходят в её структуре.

— **Выявление критических моментов.** Когда структура меняется радикально, это может быть точкой перелома.

— **Прогнозирование.** Зная, как сеть менялась в прошлом, можно предсказывать, как она будет меняться в будущем.

**Пример:** социальные сети постоянно меняются. Пользователи приходят и уходят, образуют новые группы, меняют связи. Анализ динамической структуры позволяет понять, как формируются тренды, как распространяется влияние, как возникают и исчезают сообщества.

В сверхсложных системах динамические сети являются правилом, а не исключением. Поэтому сетевой анализ должен быть не разовым, а непрерывным процессом, отслеживающим изменения в структуре.

## 26.8. Практический протокол для сетевого анализа системы

Ниже представлен практический протокол сетевого анализа системы — пошаговая процедура, позволяющая перейти от общего понимания системы к структурированному анализу её сетевой структуры.

Протокол предназначен для практического применения к любым сверхсложным системам: финансовым сетям, экосистемам, технологическим платформам, транспортным системам, социальным сетям, системам распространения информации. Он включает последовательность шагов, конкретные вопросы, методы сбора данных и инструменты анализа.

### Шаг 1. Определение границ сети

**Что делаем:** определяем, какие элементы включаются в сеть, а какие остаются за её пределами. От этого выбора зависит, что мы увидим в структуре.

#### Вопросы:

- Какие узлы являются частью исследуемой системы?
- Где проходит граница между внутренней сетью и внешним окружением?
- Какие внешние узлы, даже если они не являются частью системы, оказывают существенное влияние на её поведение?
- Каков временной горизонт анализа (сеть может ме-

няться во времени)?

### **Примеры для разных систем:**

— *Финансовая сеть*: банки, страховые компании, инвестиционные фонды, регуляторы.

— *Экосистема*: виды, популяции, ареалы, климатические факторы.

— *Технологическая платформа*: пользователи, контент, алгоритмы, рекламодатели.

— *Транспортная сеть*: узлы (города, порты, аэропорты), маршруты.

**Практический совет:** начните с широких границ, затем сужайте, исключая элементы, не влияющие на исследуемое поведение.

**Результат:** чётко определённый список узлов сети.

## **Шаг 2. Выбор типа связей**

**Что делаем:** определяем, какие типы связей мы будем анализировать. В одной системе может существовать множество типов отношений.

### **Вопросы:**

— Какие типы связей наиболее важны для понимания поведения системы?

— Будем ли мы анализировать один тип связей или несколько?

— Как разные типы связей соотносятся друг с другом?

### **Типы связей (обобщённо):**

- Информационные (обмен данными, сигналами).
- Ресурсные (обмен материальными, финансовыми, энергетическими ресурсами).
- Функциональные (зависимости, влияния, каузальные связи).
- Пространственные (географическая близость, соединённость).
- Временные (связи, существующие только в определённые периоды).

### **Примеры для разных систем:**

- *Финансовая сеть*: кредитные линии, взаимные обязательства, долевое владение, информационные потоки (рыночные сигналы).
- *Экосистема*: пищевые цепи, конкуренция, симбиоз, обмен энергией и веществом.
- *Технологическая платформа*: пользовательские подписки, репосты, рекомендации, модерационные связи.
- *Транспортная сеть*: маршруты, потоки грузов и пассажиров, пропускная способность.

**Практический совет:** начните с одного-двух наиболее важных типов связей. Добавляйте остальные по мере необходимости.

**Результат:** перечень типов связей, включённых в анализ.

## **Шаг 3. Сбор данных**

**Что делаем:** собираем информацию о связях между уз-

лами.

## **Методы сбора данных (обобщённо):**

### **А). Наблюдение и мониторинг.**

— Прямое наблюдение за взаимодействиями (для физических систем).

— Мониторинг потоков данных, транзакций, коммуникаций (для цифровых и финансовых систем).

— Спутниковое наблюдение, датчики (для экологических и климатических систем).

### **Б). Анализ существующих данных.**

— Анализ транзакционных баз данных (финансовые потоки, торговля).

— Анализ данных датчиков (транспортные потоки, экологические показатели).

— Анализ коммуникационных логов (цифровые платформы).

— Анализ научных баз данных (экологические, климатические).

### **В). Реконструкция на основе косвенных данных.**

— Вывод связей на основе корреляций (статистические методы).

— Анализ потоков энергии, вещества, информации (балансовые методы).

— Экспертная реконструкция для систем, где прямые данные недоступны.

### **Г). Экспертные методы.**

- Интервью с экспертами в предметной области.
- Метод Дельфи для согласования оценок.
- Анализ научной литературы и публикаций.

### **Вопросы для сбора данных:**

- Какие узлы связаны между собой?
- Какова интенсивность связи?
- Какова направленность связи?
- Какова временная динамика связи?

### **Примеры для разных систем:**

- *Финансовая сеть*: данные о межбанковских кредитах, торговых потоках, обязательствах.
- *Экосистема*: данные о встречаемости видов, пищевых связях, потоках энергии.
- *Технологическая платформа*: логи взаимодействий пользователей, данные о распространении контента.
- *Транспортная сеть*: данные о потоках грузов и пассажиров, времени в пути, пропускной способности.

**Практический совет:** используйте несколько методов для перекрёстной проверки данных. Расхождения между методами часто указывают на важные аспекты структуры.

**Результат:** матрица смежности (таблица связей между узлами) с указанием типа связи, направления и силы.

## **Шаг 4. Визуализация сети**

**Что делаем:** строим графическое представление сети для первичного анализа структуры.

## **Инструменты визуализации:**

- Для небольших сетей (до 30 узлов): ручная отрисовка, Miro, Lucidchart.
- Для средних сетей (30—100 узлов): Kumu, Graph Commons.
- Для больших сетей (свыше 100 узлов): Gephi, NodeXL, UCINET, NetworkX (Python), igraph (R).

## **Правила визуализации:**

- Узлы изображаются в виде кругов или точек.
- Связи — в виде линий.
- Размер узла может отражать степень центральности.
- Цвет узла — принадлежность к кластеру или тип узла.
- Толщина линии — силу связи.
- Направленность — стрелками.
- Разные типы связей — разными цветами или типами линий.

**Практический совет:** используйте алгоритмы автоматической раскладки (Force Atlas, Fruchterman-Reingold, Kamada-Kawai) для выявления естественной структуры сети.

**Результат:** визуальное представление сети, позволяющее увидеть общую структуру, кластеры, хабы и структурные разрывы.

## **Шаг 5. Анализ структуры сети**

**Что делаем:** вычисляем метрики, описывающие струк-

туру сети на уровне всей системы.

### **А). Базовые метрики:**

- **Количество узлов (N).** Размер сети.
- **Количество рёбер (E).** Общее число связей.
- **Плотность (D).** Доля существующих связей от всех возможных:  $D = 2E / (N * (N-1))$  для неориентированной сети,  $D = E / (N * (N-1))$  для ориентированной.
- Значение 0 означает полное отсутствие связей.
- Значение 1 означает полносвязную сеть.
- Высокая плотность → быстрое распространение, избыточность.
- Низкая плотность → медленное распространение, фрагментация.
- **Средняя степень узла.** Среднее число связей на узел:  $\langle k \rangle = 2E / N$  (для неориентированной сети).
- **Диаметр сети.** Наибольшее расстояние между любыми двумя узлами. Показывает, насколько сеть «мала» или «велика».

— **Среднее расстояние.** Средняя длина кратчайшего пути между всеми парами узлов.

— **Коэффициент кластеризации.** Вероятность того, что соседи узла связаны друг с другом. Высокий коэффициент → наличие плотных кластеров.

### **Б). Компоненты связности:**

- Количество компонентов (связных областей).
- Размер крупнейшего компонента.

— Наличие изолированных узлов.

## **В). Структурные разрывы:**

— Есть ли в сети «узкие места», через которые проходят все связи между крупными кластерами?

— Какова модульность сети (степень разделения на кластеры)?

**Практический совет:** если сеть большая, начните с базовых метрик, затем переходите к более сложным. Для небольших сетей достаточно визуального анализа и базовых метрик.

**Результат:** количественное описание структуры сети на макроуровне.

## **Шаг 6. Анализ центральности**

**Что делаем:** вычисляем центральность для каждого узла, чтобы выявить ключевые элементы.

### **А). Степенная центральность.**

— **Что показывает:** число связей узла. Кто является хабом.

— **Интерпретация:** узлы с высокой степенью находятся в центре взаимодействий. Они быстрее получают и передают информацию, влияние, ресурсы.

— **Примеры:** системно значимые банки, ключевые виды в экосистеме, популярные пользователи на платформе, крупные транспортные узлы.

## **Б). Посредническая центральность.**

— **Что показывает:** насколько часто узел является посредником между другими узлами.

— **Интерпретация:** узлы с высокой посреднической центральностью контролируют потоки. Они соединяют кластеры, которые иначе не были бы связаны. Потеря такого узла может фрагментировать сеть.

— **Примеры:** клиринговые центры в финансовой сети, виды-посредники в экосистеме, модераторы на платформе, узлы-переходники в транспортной сети.

## **В). Центральность близости.**

— **Что показывает:** насколько узел близок ко всем остальным узлам.

— **Интерпретация:** узлы с высокой центральностью близости могут быстро взаимодействовать с любым другим узлом. Они находятся «в центре» сети.

— **Примеры:** банки с широкой сетью корреспондентских отношений, платформы, объединяющие разные группы пользователей.

## **Г). Собственный вектор центральности.**

— **Что показывает:** важность узла с учётом важности его соседей. Связь с важными узлами увеличивает центральность.

— **Интерпретация:** узлы с высокой центральностью по собственному вектору — это хабы, связанные с другими хабами.

**Практический совет:** не ограничивайтесь одним типом центральности. Разные типы показывают разные аспекты важности узлов.

**Результат:** список узлов с их значениями центральности, выявление ключевых узлов по каждому типу.

## **Шаг 7. Выявление кластеров и сообществ**

**Что делаем:** обнаруживаем группы узлов, тесно связанных друг с другом.

**Методы кластеризации:**

**А). Метод модульности.** Оптимизирует разбиение сети на сообщества, максимизируя внутреннюю плотность связей.

— **Инструменты:** алгоритм Louvain, алгоритм Leiden.

— **Результат:** разбиение узлов на сообщества (кластеры).

**Б). Иерархическая кластеризация.** Строит дендрограмму, показывающую, как кластеры объединяются на разных уровнях.

**В). Анализ структурных разрывов.** Определяет, где плотность связей минимальна, указывая на границы между кластерами.

**Вопросы для анализа:**

— Сколько кластеров выделяется? Каков их состав?

— Каковы внутренние характеристики кластеров?

— Как кластеры связаны между собой? Есть ли посред-

ники?

— Какие функции выполняют разные кластеры?

### **Примеры кластеров в разных системах:**

— *Финансовая сеть*: группы банков, связанных взаимными обязательствами; региональные кластеры; сегменты рынка.

— *Экосистема*: трофические уровни, функциональные группы видов, биомы.

— *Технологическая платформа*: сообщества пользователей, группы по интересам, языковые кластеры.

— *Транспортная сеть*: региональные транспортные системы, логистические кластеры.

**Результат:** разбиение сети на кластеры, описание их структуры и связей между ними.

## **Шаг 8. Анализ распространения**

**Что делаем:** моделируем, как распространяются изменения по сети.

### **Типы распространения для анализа:**

#### **А). Распространение информации или влияния.**

— Как сигналы, инновации, тренды распространяются по сети?

— Какие узлы являются наиболее эффективными «источниками» распространения?

— Какие узлы являются «барьерами», замедляющими распространение?

## **Б). Распространение возмущений и кризисов.**

— Как шоки, сбои, кризисы распространяются по сети?

— Какие узлы являются наиболее уязвимыми, и через какие узлы распространяется кризис?

— Где находятся точки, сбой в которых вызывает каскадный эффект?

## **В). Распространение ресурсов.**

— Как ресурсы (энергия, вещество, капитал) распределяются по сети?

— Где находятся узкие места в распределении?

## **Методы анализа:**

— Симуляция распространения от разных начальных узлов.

— Анализ кратчайших путей и альтернативных путей.

— Выявление узлов, с которых распространение максимально быстрое или максимально широкое.

— Анализ каскадных эффектов при удалении критических узлов.

## **Примеры:**

— *Финансовая сеть*: распространение паники, системный риск.

— *Экосистема*: распространение инвазивных видов, распространение болезней.

— *Технологическая платформа*: распространение вирусного контента, мемов, трендов.

— *Транспортная сеть*: распространение сбоев при за-

крытии маршрутов.

**Результат:** понимание того, как распространяются изменения, и выявление критических точек для запуска или блокировки распространения.

## **Шаг 9. Анализ устойчивости и уязвимости**

**Что делаем:** оцениваем, насколько сеть устойчива к потерям узлов или связей.

**Сценарии для анализа:**

**А). Удаление узлов:**

- Последовательное удаление узлов с наивысшей центральностью (целенаправленная атака).
- Последовательное удаление случайных узлов (случайный отказ).
- Удаление всех узлов одного кластера.

**В). Удаление связей:**

- Удаление связей между кластерами.
- Удаление критических связей.
- Случайное удаление связей.

**Г). Что оценивать:**

- Размер крупнейшего компонента после удалений.
- Увеличение среднего расстояния.
- Появление изолированных узлов.

**Вопросы для анализа:**

- Какие узлы являются критическими?

— Какие связи являются критическими?

— Есть ли резервные пути, которые могут компенсировать потерю?

— Насколько сеть устойчива к случайным отказам?

### **Примеры критических узлов:**

— *Финансовая сеть*: системно значимые банки, клиринговые центры.

— *Экосистема*: ключевые виды, биоинженеры, виды-опылители.

— *Технологическая платформа*: ключевые пользователи-лидеры, ключевые контент-провайдеры.

— *Транспортная сеть*: крупные транспортные узлы, стратегические маршруты.

**Результат:** список критических узлов и связей, оценка устойчивости сети.

## **Шаг 10. Анализ динамических изменений**

**Что делаем:** анализируем, как структура сети меняется во времени.

### **Методы анализа:**

— Сбор данных о сети в несколько моментов времени.

— Сравнение метрик между временными срезами.

— Анализ устойчивости связей во времени.

— Выявление «жизненных циклов» связей и узлов.

### **Вопросы для анализа:**

— Как меняется структура сети со временем?

— Какие связи являются устойчивыми, а какие — временными?

— Какие узлы появляются и исчезают?

— Есть ли критические моменты, когда структура меняется радикально?

— Как динамика сети связана с динамикой системы в целом?

### **Примеры:**

— *Финансовая сеть*: слияния и поглощения банков, изменение кредитных линий.

— *Экосистема*: смена доминирующих видов, миграция, климатические сдвиги.

— *Технологическая платформа*: изменение алгоритмов, приток и отток пользователей.

— *Транспортная сеть*: строительство новых маршрутов, изменение потоков.

**Результат:** описание эволюции сети, выявление критических моментов перестройки.

## **Шаг 11. Интерпретация и выводы**

**Что делаем:** переводим результаты сетевого анализа в понимание поведения системы.

### **Вопросы для интерпретации:**

— Как структура сети объясняет наблюдаемое поведение системы?

— Какие элементы сети являются ключевыми для понимания динамики?

— Где находятся рычаги воздействия?

— Какие риски существуют из-за уязвимости сети?

— Как динамика сети связана с динамикой системы?

### **Примеры выводов:**

— *Финансовая сеть*: выявление системно значимых банков, пути распространения системного риска.

— *Экосистема*: ключевые виды для сохранения биоразнообразия, маршруты распространения инвазий.

— *Технологическая платформа*: ключевые пользователи для продвижения контента, уязвимости для модерации.

— *Транспортная сеть*: критические узлы для обеспечения связности, узкие места.

**Результат:** понимание того, как структура сети определяет поведение системы, и идентификация точек воздействия.

### **Связь с другими инструментами**

Сетевой анализ является входом для:

— **Карты причинности** — показывает, через какие элементы и связи распространяются причинные влияния.

— **Диаграммы обратных связей** — показывает, как структура отношений создаёт петли.

— **Системной динамики** — показывает, какие элементы и связи должны быть включены в модель.

— **Поиска рычагов** — показывает, где находятся критические точки для воздействия.

— **Агентного моделирования** — показывает, какие агенты и какие связи должны быть включены в модель.

## **Итоговый результат**

Сетевой анализ даёт:

— **Понимание структуры.** Как устроена сеть взаимодействий, какие элементы центральны, какие — периферийны.

— **Выявление ключевых элементов.** Кто является хабами, посредниками, критическими узлами.

— **Понимание распространения.** Как информация, влияние, ресурсы или возмущения движутся по системе.

— **Оценку устойчивости.** Насколько сеть устойчива к потерям узлов или связей.

— **Идентификацию рычагов.** Где находятся точки воздействия, изменение которых даёт максимальный эффект.

— **Понимание динамики.** Как сеть меняется во времени и как это влияет на систему.

## **Итог главы**

Сетевое мышление — это способ анализа, при котором система рассматривается как сеть взаимодействующих элементов. Оно фокусируется не на свойствах отдельных эле-

ментов, а на структуре связей между ними, на положении узлов в сети и на паттернах распространения.

Мы разобрали, как система представляется в виде сети (узлы и рёбра), как анализировать степень связанности (плотность, связность, изолированные и сверхсвязанные узлы). Обсудили три типа центральности: степенную (хабы), посредническую (мосты) и близости (быстрый доступ к другим узлам). Показали, что разные типы центральности указывают на разные роли в системе.

Особое внимание мы уделили кластерам и структурным разрывам, которые структурируют сеть и определяют, как распространяются изменения. Рассмотрели механизмы распространения (контакты, влияние, пороги, каскады) и факторы, влияющие на скорость и характер распространения (структура, центральность, кластеры, начальная точка).

Мы проанализировали устойчивость и уязвимость сети, выделили критические узлы и связи, предложили сценарии для анализа уязвимости. И завершили рассмотрением динамических сетей, которые меняются во времени, — в сверхсложных системах это правило, а не исключение.

Сетевое мышление даёт мощный инструмент для понимания сверхсложных систем. Оно показывает, как структура взаимодействий определяет поведение системы: как распространяются изменения, где находятся критические точки, как система может быть устойчивой или уязвимой.

Теперь, когда мы понимаем, как структура сети определя-

ет поведение системы, мы готовы к следующему шагу — к агентному представлению. Мы переходим от анализа структуры к анализу того, как автономные агенты, действуя по локальным правилам, создают глобальные эффекты. Если сетевое мышление показывает, *как устроена структура взаимодействий*, то агентное моделирование показывает, *как из локальных действий возникает глобальное поведение* — следующий уровень понимания сверхсложности.

## Глава 27. Агентное представление

Мы построили карту системы, карту отношений, карту причинности, диаграммы обратных связей, динамическую модель и проанализировали структуру сети. Каждый из этих инструментов дал свой ракурс. Но остаётся вопрос: *как из локальных взаимодействий множества автономных участников возникает глобальное поведение системы?*

Сетевое мышление показывает структуру взаимодействий. Системная динамика показывает, как потоки и накопления создают поведение во времени. Но ни один из этих подходов не отвечает на вопрос: как именно автономные агенты, каждый из которых действует на основе локальной информации и локальных правил, порождают коллективные эффекты? Как рынок находит равновесные цены без центрального планировщика? Как транспортная сеть самоорганизуется в ответ на изменения потоков? Как социальная сеть формирует общественное мнение без единого редактора?

Агентное представление — это способ анализа, при котором система рассматривается как множество взаимодействующих автономных агентов. Каждый агент обладает собственной логикой поведения, действует на основе локальной информации и взаимодействует с другими агентами и средой. Глобальное поведение системы возникает из этих локальных взаимодействий — как эмерджентный эффект, ко-

торый невозможно предсказать, изучая агентов по отдельности.

В сверхсложных системах агентное представление становится незаменимым. Здесь глобальные паттерны возникают из локальных действий, и без понимания того, как действуют агенты, мы не можем понять поведение системы в целом. Агентное моделирование позволяет экспериментировать с виртуальной системой, изменяя правила поведения агентов, их гетерогенность, среду и наблюдая, как меняется глобальная динамика.

В этой главе мы разберём, что такое агент в контексте системного анализа, как работают локальные правила поведения, как из локальных взаимодействий возникает коллективное поведение, почему гетерогенность агентов важна, как агенты обучаются и адаптируются, как проводятся эксперименты с виртуальной системой и каковы сильные и слабые стороны агентного подхода.

## 27.1. Кто такой агент

Агент — это автономный элемент системы, способный:

- **Воспринимать** информацию о своём окружении (локальная информация).
- **Принимать решения** на основе этой информации и своих внутренних правил.
- **Действовать** — изменять своё состояние, взаимодей-

ствовать с другими агентами, влиять на среду.

— **Адаптироваться** — изменять свои правила поведения на основе опыта (в некоторых моделях).

Агенты могут быть:

— **Гомогенными** (одинаковыми) или **гетерогенными** (различающимися по свойствам, целям, правилам).

— **Пассивными** (реагирующими на среду) или **активными** (изменяющими среду).

— **Рациональными** (оптимизирующими свою цель) или **ограниченно рациональными** (действующими на основе простых правил, эвристик).

— **Обучающимися** (изменяющими правила на основе опыта) или **необучающимися**.

В контексте сверхсложных систем агентами могут быть:

— **В экономике:** потребители, производители, инвесторы, регуляторы, банки.

— **В экосистемах:** особи, популяции, виды, колонии.

— **В социальных системах:** люди, группы, организации, институты.

— **В транспортных системах:** автомобили, пассажиры, диспетчеры, операторы.

— **В цифровых системах:** пользователи, алгоритмы, боты, серверы.

— **В финансовых системах:** трейдеры, биржи, регуляторы, рейтинговые агентства.

**Пример:** Финансовый рынок. Агенты — трейдеры, каж-

дый из которых действует на основе локальной информации (текущие цены, новости, сигналы). Каждый трейдер имеет свои правила: одни следуют тренду, другие торгуют на основе фундаментального анализа, третьи используют автоматические стратегии. Из взаимодействия этих агентов возникает глобальное поведение — динамика цен, волатильность, пузыри и крахи.

## 27.2. Локальные правила

Поведение агента определяется локальными правилами — простыми алгоритмами, которые говорят агенту, как действовать в каждой ситуации. Правила основаны на локальной информации: то, что агент может наблюдать непосредственно вокруг себя или получать через ограниченные каналы связи.

Локальные правила могут быть:

— **Правилами реагирования.** «Если цена падает, продавай». «Если соседний агент активен, становись активным».

— **Правилами принятия решений.** «Выбирай вариант с максимальной ожидаемой выгодой».

— **Правилами адаптации.** «Если стратегия приносит успех, продолжай; если нет — пробуй другую».

— **Правилами взаимодействия.** «Обменивайся информацией с ближайшими соседями». «Конкурируй за ре-

сурс с другими агентами».

Важно понимать: локальные правила могут быть очень простыми. Сложность возникает не из сложности правил, а из множества взаимодействий между агентами, следующими этим правилам.

**Пример:** Рыночные цены. Каждый агент (трейдер) действует по простому правилу: «Покупай, если ожидаешь рост; продавай, если ожидаешь падение». Ожидания формируются на основе локальной информации — текущей цены, новостей, поведения других трейдеров. Из этих простых локальных правил возникает глобальный результат — динамика цен, которая может быть сложной, нелинейной, с пузырями и обвалами.

**Пример:** Транспортные потоки. Каждый водитель (агент) действует по правилу: «Выбирай маршрут, который кажется самым быстрым, на основе текущей информации о пробках». Из локальных решений возникает глобальный паттерн — распределение транспортных потоков, которое может быть эффективным или, наоборот, создавать пробки из-за того, что все водители выбирают один и тот же маршрут.

## 27.3. Возникновение коллективного поведения

Коллективное поведение — это глобальный паттерн, возникающий из локальных взаимодействий агентов. Оно не

планируется и не контролируется ни одним агентом. Оно возникает спонтанно, как эмерджентный эффект.

### **Как возникает коллективное поведение:**

— **Взаимодействия.** Агенты взаимодействуют друг с другом, обмениваясь информацией, ресурсами, воздействиями.

— **Обратные связи.** Результаты взаимодействий возвращаются к агентам, корректируя их поведение.

— **Повторение.** Взаимодействия повторяются множество раз, создавая устойчивые паттерны.

— **Масштабирование.** Локальные паттерны распространяются на всю систему, создавая глобальные эффекты.

— **Стабилизация.** Возникший глобальный паттерн становится устойчивым и начинает влиять на локальные взаимодействия.

### **Примеры коллективного поведения:**

— **Рыночные тренды.** Индивидуальные решения трейдеров складываются в глобальный тренд (рост или падение), который затем влияет на решения каждого трейдера.

— **Паника.** Страх одного участника распространяется на других, создавая коллективную панику, которая затем усиливает страх каждого.

— **Координация.** Без центрального управления агенты могут самоорганизовываться, создавая скоординированное поведение (например, движение толпы, синхронизация в сетях).

— **Социальные нормы.** Индивидуальные предпочтения и поведение складываются в социальные нормы, которые затем ограничивают индивидуальное поведение.

**Пример:** Социальные сети. Каждый пользователь принимает решения о том, какой контент создавать, чем делиться, на что подписываться. Из этих локальных решений возникает глобальный паттерн — распространение информации, формирование общественного мнения, появление трендов. Никто не планирует, что станет вирусным. Это возникает из взаимодействия миллионов пользователей.

## 27.4. Гетерогенность агентов

В реальных сверхсложных системах агенты редко бывают одинаковыми. Они различаются по:

— **Свойствам** — размер, ресурсы, скорость, возможности.

— **Целям** — максимизация прибыли, выживание, социальное признание, минимизация риска.

— **Правилам поведения** — стратегии принятия решений, эвристики, алгоритмы.

— **Информации** — доступ к данным, способность их обрабатывать.

— **Способности к адаптации** — скорость обучения, готовность менять стратегии.

Гетерогенность важна, потому что она создаёт разнообразие.

зие поведения, которое является источником адаптивности и устойчивости системы. Если все агенты одинаковы, система становится хрупкой: одно и то же воздействие влияет на всех одинаково, и система может разрушиться. Если агенты разнородны, система может компенсировать потери одних за счёт других.

**Пример:** Финансовый рынок. Гетерогенность трейдеров — одни используют фундаментальный анализ, другие — технический, третьи — алгоритмическую торговлю — создаёт разнообразие стратегий, которое делает рынок более устойчивым и менее подверженным единообразным паникам.

**Пример:** Экосистема. Гетерогенность видов — разные стратегии выживания, разные пищевые предпочтения, разные скорости размножения — создаёт устойчивость экосистемы к изменениям. Если бы все виды были одинаковы, одно изменение среды могло бы уничтожить всю систему.

## 27.5. Обучение и адаптация агентов

В некоторых агентных моделях агенты не просто следуют фиксированным правилам. Они учатся и адаптируются на основе опыта. Это делает систему ещё более сложной и реалистичной.

Агенты могут обучаться через:

— **Пробу и ошибку.** Агент пробует разные стратегии,

оценивает их успешность и закрепляет те, которые приносят лучшие результаты.

— **Имитацию.** Агент наблюдает за успешными агентами и копирует их поведение.

— **Эволюцию.** Правила поведения агентов изменяются через отбор: те, кто успешен, передают свои правила другим (или размножаются); те, кто неуспешен, исчезают.

— **Обучение с подкреплением.** Агент получает обратную связь о результатах своих действий и корректирует поведение в направлении, которое улучшает результаты.

**Пример:** Адаптация потребителей. Потребители пробуют разные товары, оценивают их качество, и те, которые оказываются хорошими, закрепляются в их предпочтениях. Производители, в свою очередь, адаптируются к предпочтениям потребителей, создавая новые товары. Возникает коэволюционная динамика.

**Пример:** Алгоритмическая торговля. Торговые алгоритмы обучаются на исторических данных, выявляют паттерны, корректируют свои стратегии. Это делает рынок более эффективным, но может также создавать новые риски, когда алгоритмы начинают следовать одинаковым стратегиям, создавая синхронизацию и внезапные скачки.

## 27.6. Эксперименты с виртуальной системой

Одним из главных преимуществ агентного моделирования является возможность экспериментировать с виртуальной системой. Мы можем изменять:

— **Правила поведения агентов.** Что произойдёт, если изменить локальные правила? Как изменится глобальное поведение?

— **Гетерогенность агентов.** Что произойдёт, если сделать агентов более разнородными или более однородными?

— **Среду.** Что произойдёт, если изменить внешние условия (ресурсы, информацию, ограничения)?

— **Структуру взаимодействий.** Что произойдёт, если изменить сеть связей между агентами?

— **Начальные условия.** Как влияют разные начальные состояния на долгосрочную динамику?

**Пример:** Моделирование распространения эпидемии. Агенты — люди. Локальные правила — вероятность заражения при контакте, скорость выздоровления, поведенческие изменения (изоляция, ношение масок). Изменяя эти параметры, мы можем увидеть, как разные стратегии (карантин, вакцинация, социальное дистанцирование) влияют на распространение болезни. Это позволяет принимать обоснованные решения до того, как эпидемия развернётся в реально-

сти.

**Пример:** Моделирование городской динамики. Агенты — жители, компании, застройщики. Локальные правила — выбор места жительства, размещение бизнеса, инвестиции в инфраструктуру. Изменяя параметры, мы можем увидеть, как разные политики (зонирование, транспортные инвестиции, налоговые стимулы) влияют на развитие города.

## 27.7. Сильные и слабые стороны агентного подхода

### Сильные стороны:

— **Моделирование эмерджентности.** Агентное моделирование позволяет увидеть, как из локальных взаимодействий возникает глобальное поведение. Это невозможно сделать с помощью аналитических моделей или системной динамики.

— **Гетерогенность.** Возможность моделировать разнородных агентов с разными целями, правилами, стратегиями.

— **Адаптация и обучение.** Возможность моделировать, как агенты изменяют свои стратегии на основе опыта.

— **Эксперименты.** Возможность тестировать разные сценарии, изменяя правила, параметры, среду.

— **Визуализация.** Возможность видеть, как система эволюционирует во времени, что помогает понять динамику.

### Слабые стороны:

— **Зависимость от правил.** Результаты модели зависят от того, как мы определили правила поведения агентов. Если правила нереалистичны, модель даёт нереалистичные результаты.

— **Сложность калибровки.** Для калибровки модели нужны данные о поведении агентов, которые часто недоступны.

— **Риск чрезмерной сложности.** Модель может стать настолько сложной, что её трудно интерпретировать.

— **Проблема валидации.** Трудно проверить, соответствует ли поведение модели реальному поведению системы.

— **Вычислительная сложность.** Для больших систем моделирование может требовать значительных вычислительных ресурсов.

Важно понимать: агентное моделирование — это не замена других методов. Это дополнение. Оно особенно полезно, когда поведение системы определяется локальными взаимодействиями и эмерджентными эффектами, которые нельзя смоделировать с помощью других подходов.

## **27.8. Практический протокол для построения агентной модели системы**

Ниже представлен практический протокол построения агентной модели системы — пошаговая процедура, позволяющая перейти от общего понимания системы к формаль-

ной модели, в которой глобальное поведение возникает из локальных взаимодействий автономных агентов.

Протокол предназначен для практического применения к любым сверхсложным системам: финансовым рынкам, экосистемам, социальным системам, транспортным сетям, цифровым платформам. Он включает последовательность шагов, конкретные вопросы, методы сбора данных и инструменты анализа.

## **Шаг 1. Определение цели моделирования**

**Что делаем:** чётко формулируем, для чего нужна агентная модель. Без ясной цели модель становится бесконечной и теряет практическую ценность.

### **Вопросы:**

- Какой аспект поведения системы мы хотим понять?
- Какой вопрос должен быть отвечен моделью?
- Какие решения должны быть приняты на основе модели?
- Каковы границы моделируемой системы?

### **Примеры целей:**

- *Финансовый рынок:* «Как изменение правил торговли влияет на волатильность?»
- *Экосистема:* «Как изменение климата влияет на структуру пищевых сетей?»
- *Социальная система:* «Как распространение информации зависит от структуры социальной сети?»
- *Транспортная сеть:* «Как изменение маршрутов вли-

яет на пропускную способность сети?»

**Практический совет:** сформулируйте цель в виде одного предложения. Если целей несколько, выберите одну главную.

**Результат:** чёткая формулировка цели моделирования.

## Шаг 2. Идентификация агентов

**Что делаем:** определяем, кто является агентами в системе — автономными элементами, способными воспринимать, принимать решения и действовать.

### Вопросы:

- Какие элементы системы являются автономными?
- Какие элементы принимают решения и действуют?
- Какие элементы взаимодействуют друг с другом?
- Какие элементы могут быть агрегированы (объединены в группы)?

### Примеры агентов:

- *Финансовый рынок:* трейдеры, инвесторы, биржи, регуляторы.
- *Экосистема:* особи, популяции, виды, колонии.
- *Социальная система:* люди, группы, организации, институты.
- *Транспортная сеть:* автомобили, пассажиры, диспетчеры, операторы.
- *Цифровая платформа:* пользователи, алгоритмы, модераторы, рекламодатели.

**Практический совет:** начните с основных типов агентов, затем добавляйте второстепенные, если они критически важны для модели.

**Результат:** список типов агентов с их кратким описанием.

### Шаг 3. Определение свойств и состояний агентов

**Что делаем:** определяем, какими свойствами обладают агенты и в каких состояниях они могут находиться.

#### Вопросы:

- Каковы ключевые свойства агентов?
- Каковы возможные состояния агентов?
- Какие свойства являются постоянными, а какие изменяются со временем?
- Как свойства различаются между агентами (гетерогенность)?

#### Примеры свойств и состояний:

| Тип агента             | Свойства                                                      | Состояния                               |
|------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Трейдер                | Капитал, стратегия, склонность к риску, горизонт планирования | Активен, пассивен, банкрот              |
| Вид в экосистеме       | Численность, скорость размножения, пищевые предпочтения       | Стабилен, растёт, сокращается, вымирает |
| Пользователь платформы | Интересы, активность, подписки                                | Активен, пассивен, заблокирован         |
| Автомобиль             | Скорость, маршрут, тип груза                                  | Двигается, стоит, в пробке              |

**Практический совет:** включайте только те свойства, ко-

которые влияют на поведение агента. Избыточные свойства усложняют модель без пользы.

**Результат:** список свойств и состояний для каждого типа агента.

## Шаг 4. Определение локальных правил поведения

**Что делаем:** определяем, как агенты принимают решения и действуют на основе локальной информации.

### Вопросы:

- Какую информацию получает агент?
- На основе чего агент принимает решения?
- Каковы правила поведения (эвристики, алгоритмы)?
- Изменяются ли правила со временем (обучение)?

### Примеры локальных правил:

| Тип агента             | Локальная информация                      | Правило поведения                                                          |
|------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Трейдер                | Текущая цена, новости, поведение других   | «Покупай, если цена растёт и объём высокий; продавай, если цена падает»    |
| Вид в экосистеме       | Доступность пищи, численность конкурентов | «Если пищи мало → миграция; если конкурентов много → снижение рождаемости» |
| Пользователь платформы | Контент соседей, рейтинг, уведомления     | «Если понравился контент → лайк и репост; если нет → игнорировать»         |
| Автомобиль             | Информация о пробках, GPS                 | «Выбирай маршрут с минимальным временем на основе текущей информации»      |

**Практический совет:** начинайте с простых правил. Добавляйте сложность постепенно, проверяя, как она влияет на

результаты.

**Результат:** формализованные правила поведения для каждого типа агента.

## **Шаг 5. Определение взаимодействий между агентами**

**Что делаем:** определяем, как агенты взаимодействуют друг с другом и со средой.

### **Вопросы:**

- С какими агентами взаимодействует данный агент?
- Какова структура взаимодействий (сеть, случайные контакты, физическая близость)?
- Что передаётся при взаимодействии (информация, ресурсы, влияние)?
- Какова интенсивность и частота взаимодействий?

### **Примеры взаимодействий:**

- *Финансовый рынок:* трейдеры взаимодействуют через биржу — их заявки влияют на цену, которая становится доступной всем.
- *Экосистема:* виды взаимодействуют через пищевые цепи (хищник-жертва), конкуренцию за ресурсы, симбиоз.
- *Социальная система:* люди взаимодействуют через коммуникацию, которая передаёт информацию и влияние.
- *Транспортная сеть:* автомобили взаимодействуют через дорожную инфраструктуру — их скорость зависит от плотности потока.

## **Типы структуры взаимодействий:**

— **Полносвязная:** каждый агент взаимодействует со всеми.

— **Сетевая:** агенты взаимодействуют только с соседями по сети.

— **Пространственная:** агенты взаимодействуют только с теми, кто находится в пределах определённого расстояния.

— **Случайная:** агенты взаимодействуют со случайными другими агентами.

— **Иерархическая:** агенты взаимодействуют через уровни (например, институты).

**Практический совет:** используйте структуру взаимодействий, которая наиболее точно отражает реальную систему.

**Результат:** описание структуры и механизмов взаимодействий.

## **Шаг 6. Определение среды и внешних факторов**

**Что делаем:** определяем, в какой среде существуют агенты и какие внешние факторы влияют на систему.

### **Вопросы:**

— Каковы условия среды (ресурсы, ограничения, стимулы)?

— Какие внешние факторы влияют на агентов?

— Как среда изменяется со временем?

— Как агенты влияют на среду?

## **Примеры среды и внешних факторов:**

- *Финансовый рынок*: макроэкономические показатели, регуляторные изменения, новости.
- *Экосистема*: климат, сезонные изменения, человеческая деятельность.
- *Социальная система*: культурные нормы, институты, технологии.
- *Транспортная сеть*: погода, дорожные работы, крупные события.

**Практический совет:** включайте только те внешние факторы, которые оказывают существенное влияние на поведение системы.

**Результат:** описание среды и внешних факторов.

## **Шаг 7. Определение параметров модели**

**Что делаем:** определяем параметры модели — значения, которые задаются и могут изменяться для тестирования разных сценариев.

### **Вопросы:**

- Какие параметры влияют на поведение системы?
- Каковы диапазоны значений параметров?
- Какие параметры являются критическими (их изменение сильно влияет на результат)?
- Какие параметры неизвестны и должны быть оценены?

### **Примеры параметров:**

- *Финансовый рынок*: начальный капитал агентов, ско-

рость адаптации, размер комиссий.

— *Экосистема*: скорость размножения, смертность, доступность ресурсов.

— *Социальная система*: скорость распространения информации, порог принятия, структура сети.

— *Транспортная сеть*: пропускная способность дорог, интенсивность трафика, время реакции водителей.

**Практический совет:** выберите параметры, которые можно изменять в разумных пределах. Используйте экспертные оценки для неизвестных параметров.

**Результат:** список параметров с их диапазонами.

## Шаг 8. Калибровка и валидация модели

**Что делаем:** настраиваем модель так, чтобы она воспроизводила реальное поведение системы, и проверяем её адекватность.

### Калибровка:

— Сравнение поведения модели с реальными данными (если они есть).

— Настройка параметров для улучшения соответствия.

— Проверка чувствительности — как результаты меняются при изменении параметров.

### Валидация:

**А). Валидация структуры.** Соответствует ли структура модели нашему пониманию системы? Не упущены ли важные агенты, правила или взаимодействия?

**Б). Валидация поведения.** Воспроизводит ли модель наблюдаемую динамику? Как поведение модели соотносится с реальными данными?

**В). Валидация чувствительности.** Изменения параметров дают разумные результаты? При экстремальных значениях параметров модель ведёт себя правдоподобно?

**Г). Экспертная валидация.** Эксперты в предметной области подтверждают адекватность модели?

**Практический совет:** валидация — это итеративный процесс. Модель может потребовать нескольких циклов калибровки и корректировки.

**Результат:** откалиброванная и проверенная модель.

## **Шаг 9. Проведение экспериментов**

**Что делаем:** запускаем модель с разными параметрами и правилами для исследования поведения системы.

**Типы экспериментов:**

**А). Базовый сценарий.** Модель с параметрами, соответствующими текущему состоянию системы.

**Б). Анализ чувствительности.** Изменение одного параметра и наблюдение за эффектом. Какие параметры наиболее критичны?

**В). Сценарный анализ.** Изменение нескольких параметров одновременно для исследования разных сценариев развития.

**Г). Изменение структуры.** Изменение структуры взаи-

модействий агентов (например, изменение сети, добавление новых типов агентов).

**Д). Изменение правил.** Изменение локальных правил агентов для проверки того, как разные стратегии влияют на глобальное поведение.

**Е). Экстремальные сценарии.** Что происходит при экстремальных значениях параметров?

**Примеры экспериментов:**

— *Финансовый рынок:* как изменение правил торговли влияет на волатильность и риск системного кризиса?

— *Экосистема:* как изменение климата влияет на устойчивость экосистемы?

— *Социальная система:* как изменение алгоритма платформы влияет на распространение информации?

— *Транспортная сеть:* как изменение маршрутов влияет на пропускную способность сети?

**Практический совет:** для каждого эксперимента определите, что вы измеряете (метрики) и как вы будете интерпретировать результаты.

**Результат:** результаты моделирования для разных сценариев.

## **Шаг 10. Анализ и интерпретация результатов**

**Что делаем:** переводим результаты моделирования в понимание поведения системы.

**Вопросы для анализа:**

— Как структура взаимодействий и правила агентов объясняют наблюдаемое поведение?

— Какие параметры являются критическими для поведения системы?

— Какие сценарии ведут к желательным результатам, а какие — к нежелательным?

— Какие рычаги воздействия существуют для изменения поведения системы?

— Как результаты модели соотносятся с данными и наблюдениями?

### **Визуализация результатов:**

— Графики изменения ключевых переменных во времени.

— Анимация поведения агентов в пространстве или сети.

— «Тепловые карты» для выявления критических областей.

— Сравнительные диаграммы для разных сценариев.

**Практический совет:** связывайте выводы с целями моделирования, определёнными на Шаге 1.

**Результат:** понимание того, как поведение системы возникает из локальных взаимодействий, и идентификация рычагов воздействия.

## **Шаг 11. Итеративное уточнение модели**

**Что делаем:** модель — это живой инструмент. Она должна обновляться по мере поступления новых данных и углуб-

ления понимания.

### **Процедура:**

— Сравнивайте прогнозы модели с реальными событиями.

— При обнаружении расхождений проверяйте, не изменились ли правила поведения агентов или структура взаимодействий.

— Добавляйте новые типы агентов, если они появились.

— Уточняйте параметры на основе новых данных.

### **Вопросы для пересмотра:**

— Появились ли новые данные, которые требуют пересмотра модели?

— Изменилась ли система так, что прежние правила поведения устарели?

— Есть ли новые типы агентов, которые должны быть включены?

— Есть ли новые взаимодействия, которые должны быть учтены?

**Практический совет:** установите периодичность пересмотра модели (например, раз в год или при значительных изменениях в системе).

**Результат:** актуальная, обновляемая агентная модель.

### **Связь с другими инструментами**

Агентное моделирование является входом для:

— **Карты системы** — показывает, какие элементы и свя-

зи должны быть включены в агентную модель.

— **Карты отношений** — показывает структуру взаимодействий между агентами.

— **Карты причинности** — показывает, какие причинные механизмы определяют поведение агентов.

— **Сетевого анализа** — показывает структуру взаимодействий, которая может быть использована для задания связей агентов.

— **Системной динамики** — может быть использована для моделирования среды (запасы, потоки) в которой действуют агенты.

— **Поиска рычагов** — показывает, где находятся критически важные параметры, правила или структуры для изменения поведения системы.

## **Итоговый результат**

Агентное моделирование даёт:

— **Понимание эмерджентности.** Как из локальных взаимодействий возникает глобальное поведение.

— **Выявление критических правил.** Какие локальные правила наиболее важны для поведения системы.

— **Понимание роли гетерогенности.** Как разнообразие агентов влияет на поведение системы.

— **Оценку сценариев.** Как система поведёт себя при разных условиях, стратегиях и параметрах.

— **Идентификацию рычагов.** Где находятся точки воз-

действия (правила, параметры, структура взаимодействий).  
— **Экспериментальную площадку.** Возможность тестировать сценарии, которые невозможно проверить в реальности.

Агентное моделирование особенно полезно для систем, где поведение определяется локальными взаимодействиями и эмерджентными эффектами, и где гетерогенность агентов является важным фактором.

## Итог главы

Агентное представление — это способ анализа, при котором система рассматривается как множество взаимодействующих автономных агентов. Глобальное поведение системы возникает из локальных взаимодействий агентов, следующих локальным правилам.

Мы разобрали, что такое агент (автономный элемент, действующий на основе локальной информации и правил), как работают локальные правила (простые алгоритмы, определяющие поведение агента). Обсудили, как из локальных взаимодействий возникает коллективное поведение (эмерджентные паттерны, которые не планируются и не контролируются ни одним агентом). Показали, почему гетерогенность агентов важна для адаптивности и устойчивости системы, как агенты могут обучаться и адаптироваться на основе опыта.

Особое внимание мы уделили экспериментам с виртуальной системой — возможности изменять правила, параметры, среду и наблюдать, как меняется глобальное поведение. Это позволяет тестировать сценарии, которые невозможно проверить в реальной системе. И завершили обсуждением сильных и слабых сторон агентного подхода.

Агентное моделирование даёт мощный инструмент для понимания сверхсложных систем, особенно когда поведение системы определяется локальными взаимодействиями и эмерджентными эффектами. Однако оно должно использоваться в сочетании с другими методами — картами, системной динамикой, сетевым анализом. Каждый метод даёт свой ракурс, и только их совместное использование даёт объёмное понимание сверхсложных систем.

Теперь, когда мы понимаем, как локальные взаимодействия агентов порождают глобальное поведение, мы готовы к следующему шагу — к морфологическому анализу. Мы переходим от анализа поведения агентов к анализу пространства возможных конфигураций системы. Морфологический анализ позволяет исследовать, какие архитектуры вообще возможны в системе, какие комбинации параметров могут дать новые, неожиданные свойства. Это инструмент проектирования и исследования неизвестного.

## Глава 28. Морфологическое пространство

Мы построили карты, проанализировали сети, смоделировали динамику и поведение агентов. Каждый из этих инструментов дал свой ракурс. Но остаётся вопрос: *какие конфигурации системы вообще возможны?* Какие архитектуры могут существовать? Какие комбинации параметров, структур и правил способны порождать новые, неожиданные свойства?

Морфологическое пространство — это способ анализа, при котором система рассматривается как множество возможных конфигураций. Вместо того чтобы исследовать одну структуру или один набор параметров, мы исследуем пространство всех теоретически возможных комбинаций. Это позволяет выявлять новые архитектуры, которые не очевидны при поверхностном анализе, и оценивать, какие конфигурации являются жизнеспособными, а какие — нет.

В сверхсложных системах морфологический анализ становится незаменимым. Здесь конфигурационное пространство огромно, и многие возможные архитектуры никогда не были реализованы или исследованы. Понимание этого пространства позволяет проектировать новые системы, находить инновационные решения и предвидеть, как система может эволюционировать.

В этой главе мы разберём, что такое морфологическое пространство, как определять параметры системы, как анализировать комбинаторное множество, как работают морфологические ограничения, как искать новые конфигурации, как использовать морфологический анализ для проектирования и как переходить от пространства вариантов к пространству возможностей.

## 28.1. Что такое морфологическое пространство

Морфологическое пространство — это множество всех возможных конфигураций системы, определяемое комбинациями её ключевых параметров. Каждая точка в этом пространстве соответствует одной возможной архитектуре системы.

Представьте себе систему, которая может быть описана тремя параметрами: структурой (иерархическая, сетевая, плоская), типом управления (централизованное, децентрализованное, распределённое) и скоростью адаптации (медленная, средняя, быстрая). Морфологическое пространство включает все возможные комбинации этих параметров:  $3 \times 3 \times 3 = 27$  возможных конфигураций.

Морфологическое пространство позволяет:

— **Визуализировать возможности.** Увидеть, какие конфигурации возможны, а какие — нет.

— **Выявлять пробелы.** Обнаружить комбинации, которые никогда не были исследованы, но могут быть перспективными.

— **Оценивать жизнеспособность.** Определить, какие конфигурации являются устойчивыми и эффективными, а какие — нет.

— **Проектировать новые системы.** Использовать пространство для поиска инновационных архитектур.

В сверхсложных системах морфологическое пространство обычно многомерно и содержит огромное количество возможных конфигураций. Задача анализа — не перебрать все комбинации, а выделить наиболее значимые измерения и исследовать наиболее перспективные области.

## 28.2. Параметры системы

Параметры — это характеристики, которые определяют конфигурацию системы. Они могут быть:

— **Структурными.** Как устроена система? Иерархия, сеть, плоская структура? Каковы связи между элементами?

— **Функциональными.** Что делает система? Каковы её функции, цели, задачи?

— **Динамическими.** Как быстро система реагирует? Какова скорость адаптации? Каковы задержки?

— **Ресурсными.** Какие ресурсы доступны? Как они распределены?

— **Поведенческими.** Как ведут себя элементы? Каковы их правила, стратегии, стимулы?

При выборе параметров важно:

— **Выделить существенные.** Включать только те параметры, которые действительно влияют на поведение системы.

— **Ограничить размерность.** Слишком много параметров делают пространство необозримым.

— **Определить диапазоны.** Для каждого параметра задать возможные значения или типы.

**Примеры параметров для разных систем:**

— *Организация:* структура управления, стиль лидерства, скорость принятия решений, уровень формализации.

— *Экосистема:* разнообразие видов, связность пищевых сетей, скорость обмена энергией, стабильность климата.

— *Технологическая платформа:* архитектура (централизованная, децентрализованная), правила модерации, алгоритмы рекомендаций, модель монетизации.

— *Транспортная сеть:* плотность маршрутов, пропускная способность, скорость движения, интегрированность.

Важно понимать: параметры не являются независимыми. Изменение одного параметра может сделать некоторые комбинации другого параметра невозможными или нежизнеспособными.

## 28.3. Комбинаторное множество

Комбинаторное множество — это все теоретически возможные комбинации параметров. Если у нас есть  $n$  параметров, каждый из которых может принимать  $k$  значений, общее число комбинаций равно  $k^n$ .

Проблема в том, что для сверхсложных систем это число может быть огромным. Даже при небольшом числе параметров комбинаторное множество быстро становится необозримым.

**Пример:** Система с 5 параметрами, каждый из которых может принимать 5 значений, даёт  $5^5 = 3125$  комбинаций. Система с 10 параметрами по 10 значений —  $10^{10} = 10$  миллиардов комбинаций.

Поэтому задача морфологического анализа — не перебор всех комбинаций, а:

- **Сужение пространства.** Исключение комбинаций, которые невозможны или нежизнеспособны.

- **Выявление структуры.** Понимание того, какие параметры являются независимыми, а какие связаны.

- **Фокусировка на перспективных областях.** Исследование тех областей пространства, которые наиболее интересны для целей анализа.

**Подходы к работе с комбинаторным множеством:**

- **Морфологическая матрица.** Таблица, в которой

строки — параметры, столбцы — их возможные значения. Комбинации ячеек из разных строк дают возможные конфигурации.

— **Анализ кросс-воздействий.** Оценка того, как изменение одного параметра влияет на другие.

— **Сценарный подход.** Исследование не всех комбинаций, а только наиболее значимых сценариев.

— **Вычислительные методы.** Использование алгоритмов для поиска перспективных областей в больших пространствах.

## 28.4. Морфологические ограничения

Не все комбинации параметров возможны или жизнеспособны. Существуют ограничения, которые сужают морфологическое пространство.

### Типы ограничений:

— **Физические.** Законы природы, материальные пределы, пропускная способность.

— **Технологические.** Доступные технологии, уровень развития, совместимость.

— **Экономические.** Ресурсы, затраты, эффективность.

— **Организационные.** Правила, структуры, культура.

— **Институциональные.** Законы, нормы, регуляции.

— **Исторические.** Зависимость от пройденного пути.

— **Когнитивные.** Ограничения восприятия, понимания,

принятия решений.

### **Примеры ограничений:**

— *Организация*: Не все структуры управления совместимы с определённой культурой. Иерархическая структура требует формальных правил; сетевая — высокой автономии и доверия.

— *Экосистема*: Не все комбинации видов возможны из-за пищевых связей, конкуренции, климатических ограничений.

— *Технологическая платформа*: Некоторые алгоритмы рекомендаций требуют больших вычислительных ресурсов; другие — больших объёмов данных.

— *Транспортная сеть*: Пропускная способность ограничена физической инфраструктурой; плотность маршрутов ограничена стоимостью строительства.

Понимание ограничений критически важно для морфологического анализа. Оно позволяет исключать невозможные или нежизнеспособные конфигурации и фокусироваться на реально достижимых архитектурах.

## **28.5. Поиск новых конфигураций**

Одна из главных задач морфологического анализа — обнаружение новых, неочевидных конфигураций. Это особенно важно для инноваций и проектирования.

### **Методы поиска новых конфигураций:**

— **Комбинирование крайних значений.** Исследование конфигураций, которые находятся на границах пространства (экстремальные комбинации параметров).

— **Поиск пробелов.** Выявление комбинаций, которые никогда не были реализованы, но теоретически возможны.

— **Кросс-отраслевой анализ.** Перенос конфигураций из одной области в другую (например, применение принципов экосистем к организациям).

— **Инверсия.** Рассмотрение противоположных комбинаций (например, вместо централизованной структуры — полностью децентрализованная).

— **Случайный поиск.** Генерация случайных комбинаций для обнаружения неожиданных паттернов.

### **Примеры новых конфигураций:**

— *Организация:* Гибридные структуры, сочетающие иерархию и сеть (матричные структуры, проектные офисы, платформенные модели).

— *Технологическая платформа:* Децентрализованные алгоритмы рекомендаций (вместо централизованных), краудсорсинговые модели модерации.

— *Транспортная сеть:* Интеграция разных видов транспорта в единую систему с динамическим ценообразованием и маршрутизацией.

Поиск новых конфигураций — это не случайный процесс. Он требует понимания пространства, ограничений и критериев оценки. Без систематического подхода мы рискуем упу-

стить перспективные архитектуры.

## **28.6. Морфологический анализ как инструмент проектирования**

Морфологический анализ особенно полезен для проектирования новых систем. Он позволяет систематически исследовать пространство возможных архитектур и выбирать оптимальные конфигурации.

**Протокол морфологического проектирования:**

**Шаг 1. Определение параметров.** Выделить ключевые параметры системы.

**Шаг 2. Определение значений.** Для каждого параметра задать возможные значения или типы.

**Шаг 3. Оценка ограничений.** Определить, какие комбинации невозможны или нежизнеспособны.

**Шаг 4. Генерация конфигураций.** Создать множество возможных конфигураций (вручную или с помощью алгоритмов).

**Шаг 5. Оценка конфигураций.** Оценить каждую конфигурацию по критериям (эффективность, устойчивость, стоимость, адаптивность).

**Шаг 6. Выбор оптимальной.** Выбрать конфигурацию, которая наилучшим образом удовлетворяет критериям.

**Шаг 7. Итеративное уточнение.** Уточнять параметры и ограничения на основе результатов оценки.

**Пример:** Проектирование новой организации. Параметры: структура (иерархическая, сетевая, гибридная), стиль лидерства (авторитарный, демократический, ситуационный), скорость принятия решений (быстрая, взвешенная, коллегиальная), уровень формализации (высокий, средний, низкий). Морфологическое пространство включает  $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$  конфигурацию. После учёта ограничений (не все сочетания жизнеспособны) остаётся 20—30 конфигураций. Их оценка позволяет выбрать оптимальную архитектуру.

## 28.7. От пространства вариантов к пространству возможностей

Морфологическое пространство — это пространство вариантов (всех теоретически возможных конфигураций). Но не все варианты являются возможностями. Возможность — это вариант, который не только возможен, но и жизнеспособен, достижим и устойчив.

### **Различие между вариантом и возможностью:**

— **Вариант.** Любая комбинация параметров, которая не противоречит ограничениям.

— **Возможность.** Вариант, который является жизнеспособным в реальных условиях, может быть реализован и обеспечивает желательные результаты.

Переход от пространства вариантов к пространству возможностей требует:

— **Оценки жизнеспособности.** Какие конфигурации могут существовать и функционировать в реальных условиях?

— **Оценки достижимости.** Какие конфигурации могут быть реализованы с учётом ресурсов, времени и ограничений?

— **Оценки устойчивости.** Какие конфигурации сохраняют свои свойства при изменении условий?

— **Оценки адаптивности.** Какие конфигурации способны адаптироваться к изменениям?

**Пример:** В организации не все структуры управления, теоретически возможные, являются достижимыми. Переход от иерархической к сетевой структуре требует времени, ресурсов и изменения культуры. Некоторые конфигурации являются теоретически возможными, но практически недостижимыми.

Понимание разницы между вариантами и возможностями критически важно для проектирования. Мы не должны выбирать конфигурацию только потому, что она возможна в теории. Мы должны выбирать ту, которая является возможностью — достижимой, жизнеспособной и устойчивой.

## **28.8. Практический протокол для морфологического анализа системы**

Ниже представлен практический протокол морфологиче-

ского анализа системы — пошаговая процедура, позволяющая исследовать пространство возможных конфигураций системы и выявлять перспективные архитектуры.

Протокол предназначен для практического применения к любым сверхсложным системам: организациям, экосистемам, технологическим платформам, транспортным системам, социальным системам. Он включает последовательность шагов, конкретные вопросы, методы сбора данных и инструменты анализа.

## **Шаг 1. Определение цели и границ анализа**

**Что делаем:** чётко формулируем, для чего нужен морфологический анализ. Без ясной цели пространство становится бесконечным и теряет практическую ценность.

# Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.