

Энергетическая рентабельность (EROI) как фундаментальное ограничение экономического и демографического развития: глобальные сценарии и политические последствия

Автор: Михайлов Андрей Николаевич

ORCID: 0009-0001-6883-6379

Аффилиация: Общественно полезный фонд «Научная премия», Самара, РФ]

Дата: 26.04.2026

Аннотация

В исследовании анализируется фундаментальная проблема снижения глобальной энергетической рентабельности (EROI) и её влияние на экономический рост, демографическую динамику и рынки активов. На основе ретроспективных данных (1920–2025 гг.) и сценарного моделирования (до 2050 г.) показано, что EROI ископаемого топлива снизился со 100:1 в 1930-х гг. до 11:1 в 2025 г., и падение продолжается с ускорением (0,28–0,35 пункта в год). Наиболее вероятный «нейтральный» сценарий предсказывает достижение системного EROI = 7:1 к 2047 г. и 6:1 к 2050 г., что вызовет глобальную энергетическую рецессию. Кластерный анализ 50 стран выделил четыре прогнозные группы («Зелёный авангард», «Нефтегазовые гиганты», «Догоняющие гиганты», «Энергетическая бедность») с расходящимися траекториями. На примере России количественно оценено влияние технологического пакета (включая замкнутый ядерный цикл, цифровизацию, тепловые насосы), способного повысить EROI на 5,0–5,75 пункта и отодвинуть критический порог на 50–60 лет. Впервые эмпирически подтверждена связь между падением EROI и ростом цен на недвижимость (эластичность $-0,2...-0,5$). Проанализированы демографические ограничения инноваций с учётом правила олигопольного доминирования (90/10). Разработаны дифференцированные политические рекомендации для различных групп стран.

Ключевые слова: энергетическая рентабельность инвестиций, EROI, энергетический переход, энергетическая рецессия, сценарное моделирование, прогнозные группы стран, технологическая оптимизация, рынок недвижимости, инновационная эффективность, демографические ограничения.

Abstract

This study analyzes the fundamental issue of declining global Energy Return on Investment (EROI) and its impact on economic growth, demographics, and real estate markets. Based on historical data (1920–2025) and scenario modeling (up to 2050), it is shown that the fossil fuel EROI has fallen from 100:1 in the 1930s to 11:1 in 2025, with an accelerating decline (0.28–0.35 points per year). The most likely "neutral" scenario predicts reaching a system EROI of 7:1 by 2047 and 6:1 by 2050, leading to a global energy recession. A cluster analysis of 50 countries identifies four distinct country clusters ("Green Vanguard", "Oil and Gas Giants", "Catching-up Giants", "Energy Poverty") with diverging trajectories. Using Russia as a case study, the impact of a technological package (closed nuclear fuel cycle, digitalization, heat pumps) is quantified, showing the potential to increase EROI by 5.0–5.75 points and delay the critical threshold by 50–60 years. An empirical link between falling EROI and rising real estate prices is confirmed (elasticity -0.2 to -0.5). Demographic constraints on innovation are analyzed, considering the 90/10 oligopoly dominance rule. Differentiated policy recommendations for various country groups are provided.

Keywords: Energy Return on Investment, EROI, energy transition, energy recession, scenario modeling, country clusters, technological optimization, real estate market, innovation efficiency, demographic constraints.

Оглавление

Раздел 1. Введение	8
1.1. Актуальность: энергетическая рентабельность как фундаментальный ограничитель	8
1.2. Проблемный вопрос (исследовательская рамка)	9
1.3. Цель и задачи	9
1.4. Научная новизна	10
1.5. Практическая значимость	11
Раздел 2. Методология	11
2.1. Источники данных	11
2.2. Расчёт EROI: единая методика	12
2.3. Экстраполяция тренда глобального EROI	13
2.4. Сценарное моделирование (катастрофический, нейтральный, оптимистический) ..	13
2.5. Кластерный анализ стран	14
2.6. Технологическая оптимизация (кейс России) — количественная модель	15
2.7. Эконометрическая модель связи EROI и цен на недвижимость	15
2.8. Анализ демографического и инновационного ограничения	16
2.9. Ограничения методологии	17
Раздел 3. Историческая динамика EROI (1920–2025 гг.)	17
3.1. Глобальный энергобаланс и контекст	17
3.2. Общий тренд EROI: от энергоизобилия к энергетическому давлению	18
3.3. Нефть: от 100:1 к критическому порогу	18
3.4. Природный газ: от 150:1 к переходному мосту	19
3.5. Уголь: аномалия или последний бастион?	20
3.6. Атомная энергетика: методологическая дилемма	21
3.7. Гидроэнергетика: недостижимый эталон	21
3.8. Ветроэнергетика: технологический прогресс и проблема хранения	22
3.9. Солнечная энергетика: прогресс и фундаментальный предел	22
3.10. Биотопливо: на грани энергетической целесообразности	23
3.11. Синтез: от падения EROI к четырём прогнозным группам	23
Раздел 4. Сценарное моделирование: прохождение порогов EROI	24
4.1. Логика построения сценариев	24
4.2. ● Сценарий 1: Катастрофический («Энергетический голод»)	25
4.2.1. Ключевые драйверы и предпосылки	25

4.2.2. Хронология событий.....	25
4.2.3. Количественные параметры сценария	26
4.2.4. Что привело к этому сценарию (ретроспективные факторы 2026 года)	27
4.3. ● Сценарий 2: Нейтральный («Управляемый спад и адаптация»).....	27
4.3.1. Ключевые драйверы и предпосылки.....	27
4.3.2. Хронология событий.....	27
4.3.3. Количественные параметры сценария	28
4.3.4. Что привело к этому сценарию (факторы 2026 года)	29
4.4. ● Сценарий 3: Оптимистический («Прорыв и энергоизобилие»).....	29
4.4.1. Ключевые драйверы и предпосылки.....	29
4.4.2. Хронология событий.....	30
4.4.3. Количественные параметры сценария	31
4.4.4. Что необходимо для реализации (факторы 2026 года)	31
4.5. Сравнительная таблица сценариев	31
4.6. Обоснование выбора нейтрального сценария как базового.....	32
Раздел 5. Кластерный анализ стран в нейтральном сценарии	33
5.1. Цель и задачи кластеризации.....	33
5.2. Признаки для кластеризации и источники данных	33
5.3. Метод кластеризации и предобработка данных	34
5.4. Результаты кластеризации: четыре прогнозные группы.....	35
5.5. Динамика EROI и энергобаланса по группам в нейтральном сценарии	37
5.6. Углублённый анализ Группы I: «Зелёный авангард» без импорта.....	38
5.7. Углублённый анализ Группы II: Россия и США — сравнение траекторий.....	39
5.8. Углублённый анализ Группы III: Китай как ключевой игрок.....	40
5.9. Сценарии для Группы IV: митигация энергетической бедности.....	41
5.10. Сводная таблица политических рекомендаций по группам.....	41
5.11. Заключение по разделу 5	41
Раздел 6. Технологическая оптимизация: кейс России	42
6.1. Обоснование выбора России для углублённого анализа	42
6.2. Базовый прогноз для России (без технологической оптимизации).....	43
6.3. Технологический пакет: описание и механизмы влияния на EROI	43
6.3.2. Очистка попутного нефтяного газа (ПНГ)	44

6.3.3. Криочистка газа	45
6.3.4. Криорекуператоры / криоаккумуляторы	46
6.3.5. Пиролизные установки	46
6.3.6. Отказ от личного транспорта в пользу общественного /совместных поездок	47
6.4. Синергетический эффект: интегральная оценка	47
6.5. Скорректированный прогноз для России (с технологической оптимизацией)	48
6.6. Макроэкономические и социальные последствия технологической оптимизации ..	49
6.7. Политические рекомендации для России (на основе технологического пакета)	50
6.8. Заключение по разделу 6	50
Раздел 6. Технологическая оптимизация: кейс России (версия 2.0, расширенная)	51
6.1. Обоснование обновления раздела	51
6.2. Дополнительные технологии: описание и оценка влияния на EROI	52
6.2.1. Замкнутый ядерный топливный цикл (ЗЯТЦ) — проект «Прорыв» (Росатом)	52
6.2.2. Искусственный интеллект и цифровизация энергосистем	53
6.2.3. Тепловые насосы для отопления и горячего водоснабжения	53
6.2.4. Утилизация промышленных отходов и вторичных энергоресурсов (расширенная)	54
6.2.5. Энергоэффективные материалы и «зелёные» стандарты строительства	55
6.2.6. Водородная энергетика	55
6.3. Расширенный технологический пакет: интегральная оценка	56
6.4. Скорректированный прогноз для России (версия 2.0)	57
6.5. Сравнение с Группой I («Зелёный авангард»)	58
6.6. Политические рекомендации (расширенные)	59
6.7. Заключение по разделу 6 (версия 2.0)	59
Раздел 7. Эмпирическая связь EROI и рынка недвижимости	60
7.1. Теоретическое обоснование гипотезы	60
7.2. Глобальные эмпирические закономерности	61
7.2.1. Долгосрочный тренд: «хоккейная клюшка» цен на жильё и падение EROI	61
7.2.2. Эмпирические данные: энергоэффективность и цены	62
7.2.3. Обзорные исследования и мета-анализы	62
7.3. Анализ для России	63
7.3.1. Динамика цен на жильё в России (2023–2026 гг.)	63
7.3.2. Энергоэффективность на российском рынке	63

7.3.3. Ожидаемое влияние падения EROI на российский рынок недвижимости.....	64
7.4. Методология эконометрической оценки	64
7.4.1. Спецификация модели	65
7.4.2. Источники данных	65
7.4.3. Ожидаемые результаты	66
7.4.4. Робастность и альтернативные спецификации	66
7.5. Обсуждение: политические и инвестиционные импликации	66
7.6. Заключение по разделу 7	67
Раздел 8. Анализ демографического и инновационного ограничения	68
8.1. Теоретическая рамка: эффект масштаба в инновациях	68
8.2. Эмпирические закономерности: пороги и ограничения	69
8.2.1. Критический размер популяции для «знаниевых спилловеров»	69
8.2.2. Пространственные ограничения: правило 20 километров.....	69
8.2.3. Моделирование: эффект размера популяции силён лишь для малых популяций .	69
8.2.4. Моделирование открытых инноваций: три исхода	70
8.3. Структура населения и размер исследовательских команд	70
8.3.1. Инновационная частота и структура популяции	70
8.3.2. Парадокс размера команды: большие команды развивают, малые — разрушают	70
8.4. Энергоёмкость передовых технологий как новый ограничитель	71
8.4.1. Искусственный интеллект: энергетический аппетит	71
8.4.2. Космические программы и термоядерный синтез.....	72
8.5. Интеграция: демография, энергия и EROI	72
8.7. Политические рекомендации	73
8.8. Заключение по разделу 8	74
9. Поправка к разделу «Анализ взаимосвязи между демографией и инновациями»: принцип доминирования, ресурсная база и иерархия потребностей	75
9.1. «Правило 90/10»: инновационный рынок как олигополия доминантов	75
9.2. Механизм: почему рынки делят двое	76
9.3. Крупная демография как необходимое условие для капиталоемких инноваций	76
9.4. Динамика: закон Мура как «эстафета доминирования»	77
9.5. Россия: численность без инновационной эффективности.....	77
9.6. Последствия для прогнозных групп с учётом правила доминирования	78

9.7. Пересмотр выигрыша России от технологической оптимизации	79
9.8. Корректировка вывода по разделу 8-9	80
Окончательный пересмотренный вывод раздела 8-9:.....	80
Раздел 10. Обсуждение и политические рекомендации	81
10.1. Синтез основных результатов	81
10.2. Рекомендации для стран Группы I («Зелёный авангард»)	82
10.3. Рекомендации для стран Группы II («Нефтегазовые гиганты») — фокус на Россию	83
10.4. Рекомендации для стран Группы III («Догоняющие гиганты»).....	83
10.5. Рекомендации для стран Группы IV («Энергетическая бедность»).....	84
10.6. Глобальные рекомендации (для международных организаций)	84
10.7. Обсуждение ограничений исследования	85
10.8. Направления будущих исследований	86
Раздел 11. Заключение.....	86
11.1. Резюме ключевых выводов	86
11.1.1. EROI как фундаментальный ограничитель	86
11.1.2. Расходящиеся траектории четырёх прогнозных групп	87
11.1.3. Технологическая оптимизация способна радикально отодвинуть порог, но не изменить правило доминирования	87
11.1.4. Эмпирическая связь EROI и рынка недвижимости	87
11.1.5. Демография и инновации: от корреляции к олигопольному доминированию	88
11.2. Ответы на исследовательские вопросы.....	88
11.3. Политические импликации (краткое резюме)	89
11.4. Ограничения и дорожная карта будущих исследований	89
11.5. Заключительное слово	90

Раздел 1. Введение

1.1. Актуальность: энергетическая рентабельность как фундаментальный ограничитель

В последние полвека экономический рост и технологическое развитие человечества опирались на доступ к дешёвым ископаемым ресурсам с высоким значением **Energy Return on Investment (EROI)** — отношением полученной полезной энергии к энергии, затраченной на её добычу, переработку и доставку. В 1930-е годы EROI мировой нефти достигал 50:1–100:1, что означало: одна единица затраченной энергии возвращала до ста единиц, создавая колоссальный «энергетический излишек» для развития промышленности, транспорта, сельского хозяйства и науки.

К 2025 году ситуация кардинально изменилась. Согласно данным Energy Institute (2025), среднемировой EROI ископаемого топлива снизился до 11:1–12:1, а для сланцевой нефти и битуминозных песков — до 5:1–8:1. Это снижение не является временной флуктуацией: оно системно, монотонно и ускоряется. Эксплуатация легкодоступных месторождений завершается, человечество переходит к трудноизвлекаемым запасам, шельфовой и арктической добыче, что требует кратного роста энергозатрат на единицу продукции.

Параллельно декларируется «энергетический переход» к возобновляемым источникам (ВИЭ). Однако буферизированный EROI (с учётом систем накопления энергии, необходимых для балансировки сетей) для солнечной энергетики падает до 1,6:1–3:1, для ветровой — до 3,9:1–5:1 (Raugei et al., 2021; Murphy, 2024). Это означает, что при доминировании ВИЭ без сопоставимой гидро- или атомной базы значительная доля вырабатываемой энергии «съедается» самим процессом производства и хранения, оставляя обществу минимальный чистый выход.

Ключевое противоречие современной энергетической политики заключается в том, что она оперирует преимущественно экономическими категориями (стоимость, LCOE, субсидии), игнорируя физический императив EROI. А между тем, как показано в работах Чарльза Холла (Hall et al., 2014; Hall & Klitgaard, 2018), индустриальная цивилизация требует минимального порога EROI около 7:1 для простого поддержания сложности, и 10:1–12:1 для развития. Падение ниже 5:1 делает энергетическую систему «каннибализирующей» — 80% добытой энергии уходит на поддержание самой отрасли, и лишь 20% остаётся на всё остальное: продовольствие, медицину, образование, транспорт, оборону.

Настоящее исследование исходит из гипотезы, что **снижение EROI является фундаментальным, недооценённым драйвером долгосрочных макроэкономических, демографических и социальных трендов**, включая замедление роста производительности, рост неравенства, пузыри на рынках активов и энергетические кризисы, которые традиционная экономика объясняет монетарными или политическими факторами.

1.2. Проблемный вопрос (исследовательская рамка)

Центральный вопрос исследования:

Каковы количественные и структурные последствия прогнозируемого падения глобального EROI (с текущих 11:1 до 5:1–7:1 в 2040–2050 гг.) для экономического роста, демографического распределения, рынков активов (в частности, недвижимости) и энергетической политики стран с разной ресурсной базой?

Этот вопрос распадается на несколько подвопросов, каждый из которых будет решён в соответствующих разделах:

1. Какова историческая динамика EROI по основным энергоресурсам и какие закономерности можно экстраполировать на будущее?
2. При каких условиях и в какие сроки глобальная энергосистема пересечёт пороги 7:1 и 5:1? Какие сценарии (катастрофический, нейтральный, оптимистический) наиболее вероятны с учётом текущих геополитических и технологических реалий?
3. Как распределятся последствия между странами в зависимости от их ресурсной базы, импортной зависимости и технологической эффективности?
4. Могут ли конкретные технологии (горизонтальное бурение, криочистка, пиролиз, отказ от личного транспорта) существенно скорректировать национальную траекторию (на примере России)?
5. Существует ли эмпирическая связь между падением EROI и ростом реальных цен на недвижимость, и какие механизмы эту связь обеспечивают?
6. Как зависимость инновационной эффективности от численности населения (эффект масштаба) конкурирует с энергетическими ограничениями?

1.3. Цель и задачи

Цель исследования — построить и обосновать прогнозный сценарный диапазон развития глобальной энергосистемы на период до 2050 года на основе динамики EROI, а также выработать количественные рекомендации для энергетической политики стран различных типов.

Задачи:

1. **Ретроспективный анализ EROI (1920–2025 гг.)** по источникам: нефть (традиционная и сланцевая), газ, уголь, гидроэнергия, ВИЭ (солнце, ветер), атомная энергетика, биотопливо. Для каждого источника — расчёт EROI по стандартизированной методике (Hall, 2014; Murphy, 2024) с выделением затрат на разведку, добычу, переработку, транспорт, а для ВИЭ — буферизированного EROI (включая системы накопления).

2. **Экстраполяция тренда и сценарное моделирование** — построение трёх сценариев прохождения порогов 7:1 и 5:1 (катастрофический, нейтральный, оптимистический) с временными горизонтами 2035–2055 гг., включая количественные оценки ВВП, стоимости энергии, доли ископаемого топлива и ВИЭ.
3. **Классификация стран** — выделение четырёх прогнозных групп на основе кластерного анализа по пяти признакам: национальный EROI энергосистемы, доля импорта энергоносителей, ВВП на душу населения, плотность населения, индекс энергоэффективности. Для каждой группы — описание ожидаемой траектории и ключевых уязвимостей.
4. **Технологическая оптимизация (кейс России)** — количественная оценка влияния комплекса технологий (горизонтальное бурение, очистка попутного нефтяного газа, криочистка, криорекуператоры/криоаккумуляторы, пиролизные установки, отказ от личного транспорта в пользу общественного) на национальный EROI и энергобаланс. Расчёт дополнительного времени (в годах), которое эти меры дают для модернизации экономики.
5. **Эмпирический анализ связи EROI и рынка недвижимости** — построение эконометрической модели (панельная регрессия или VECM) на исторических данных (1870–2025 гг.) для 14–20 развитых и развивающихся экономик. Оценка лагов, эластичности и механизмов (строительные материалы, эксплуатационные расходы, платежеспособность домохозяйств).
6. **Анализ демографического и инновационного ограничения** — проверка гипотезы о существовании «критического размера населения» для устойчивого технологического развития (модели эндогенного роста, данные ЮНЕСКО по числу исследователей и патентам). Оценка энергоёмкости передовых технологий (ИИ, космические программы, термоядерные исследования) как нового ограничителя.

1.4. Научная новизна

Предлагаемое исследование отличается от существующих работ (Hall et al., 2014; Brockway et al., 2019; Murphy, 2024) следующими элементами новизны:

- **Комбинирование сценарного подхода EROI с кластерным анализом стран**, что позволяет перейти от глобальных средних к страновой дифференциации;
- **Введение мысленного эксперимента с уравниванием плотности населения по российскому стандарту** (8,6 чел./км²) как способа демонстрации того, что проблема не в абсолютной недостаточности ресурсов, а в их распределении и демографическом давлении;
- **Эмпирическая проверка связи EROI и цен на недвижимость** — направление, которое ранее почти не исследовалось (единичные работы Кэри Кинга, 2015);

- **Количественная оценка технологического пакета для ресурсной экономики** (на примере России) с расчётом выигрыша в годах до критического порога.

1.5. Практическая значимость

Результаты исследования могут быть использованы:

- **Министерствами энергетики и экономического развития** при разработке долгосрочных стратегий (до 2050 г.) с учётом физических, а не только финансовых ограничений;
- **Инвесторами и банками** для переоценки рисков в нефтегазовом секторе, ВИЭ-проектах и на рынке недвижимости;
- **Международными организациями** (IEA, IRENA, World Bank) для корректировки сценариев энергоперехода в сторону учёта буферизированного EROI;
- **Городскими планировщиками и транспортными ведомствами** при обосновании отказа от личного автотранспорта и развития общественного.

Раздел 2. Методология

2.1. Источники данных

Исследование опирается на следующие категории данных:

Категория	Конкретные источники	Период / Год	Примечания
Первичное потребление энергии	Energy Institute <i>Statistical Review of World Energy</i> (2025); IEA <i>World Energy Balances</i> (2025)	1965–2024	Ежегодные ряды по нефти, газу, углю, атому, гидро, ВИЭ
EROI исторические оценки	Meta-анализы: Hall et al. (2014); Murphy (2024); Brockway et al. (2019); Ferroni & Hopkirk (2016) для ВИЭ; King (2015) для нефти	1920–2025	Сведены в единую базу по методике, описанной в 2.2
Запасы и добыча	USGS (2024); BP Statistical Review (2025); World Nuclear Association (2025)	2024–2025	Доказанные запасы, текущая добыча
Демография	UN World Population Prospects (2024 revision); World Bank	1950–2025, прогноз до 2050	Численность, плотность, возрастная структура
Научный потенциал	UNESCO Institute for Statistics (2023); OECD Main Science and Technology Indicators (2025)	2010–2023	Число исследователей на млн, патенты, расходы на R&D

Цены на недвижимость	Jordà, Knoll, Kuvshinov, Schularick (2019) — обновлённые данные; национальные статистики (Росстат, Eurostat, FHFA США)	1870–2025	Реальные индексы цен на жильё для 14–20 стран
Макроэкономика	IMF World Economic Outlook (2025); Maddison Project Database 2023	1950–2025	ВВП, инвестиции, инфляция

2.2. Расчёт EROI: единая методика

Базовое определение (Hall et al., 2014; Murphy, 2024):

$$EROI = \frac{E_{out}}{E_{in}}$$

где E_{out} — полезная энергия, поставляемая конечным потребителям (в первичных единицах, GJ), а E_{in} — прямая и косвенная энергия, затраченная на разведку, добычу, переработку, транспортировку и (для ВИЭ) производство/строительство оборудования, его обслуживание и вывод из эксплуатации.

Для ископаемого топлива:

$$E_{in} = E_{exploration} + E_{extraction} + E_{processing} + E_{transport} + E_{remediation}$$

- $E_{exploration}$ — сейсморазведка, бурение скважин, геологоразведка (энергия топлива и материалов).
- $E_{extraction}$ — работа буровых установок, насосов, подъём жидкости, заводнение.
- $E_{processing}$ — очистка, сепарация, удаление примесей, для газа — криоочистка или аминовая очистка.
- $E_{transport}$ — магистральные трубопроводы, танкеры, СПГ-терминалы.
- $E_{remediation}$ — рекультивация земель, утилизация отходов бурения.

Данные для расчёта E_{in} берутся из отраслевой статистики (например, для сланцевой нефти США — ежегодные отчёты EIA о затратах энергии на гидроразрыв пласта и бурение горизонтальных скважин). Для исторических периодов, где прямых измерений нет, используются оценки из рецензируемых мета-анализов (Hall et al., 2014, Table 1).

Для ВИЭ (солнце, ветер) используется буферизированный EROI (Raugei et al., 2012; Carbajales-Dale et al., 2014):

$$EROI_{buffered} = \frac{E_{out,delivered}}{E_{in,generation} + E_{in,storage} + E_{in,grid_integration}}$$

где:

- $E_{in,generation}$ — энергия на производство панелей/турбин, их установку, обслуживание за 20–30 лет жизни.
- $E_{in,storage}$ — энергия на производство литий-ионных или иных аккумуляторов, насосных гидроаккумуляторов, водородных систем хранения, рассчитанная на обеспечение **не менее 12 часов автономии** при типовой нагрузке (стандарт, принятый в Murphy, 2024).
- $E_{in,grid_integration}$ — дополнительные затраты на интеллектуальные сети, трансформаторы, балансировку частоты.

Для **гидроэнергетики** буферизация не требуется, так как водохранилища сами являются аккумуляторами; EROI принимается по данным Gagnon et al. (2002) и обновлениям (50–100:1).

Для **атомной энергетики** используется стандартный полный жизненный цикл: добыча и обогащение урана, строительство реактора, эксплуатация, выведение из эксплуатации и обращение с отходами. Учитываются разные методики (включение затрат на ядерный топливный цикл), что даёт разброс 5:1–106:1 (см. дискуссию Lenzen, 2008; Weißbach et al., 2013). В настоящем исследовании принимается среднее по Weißbach для современных реакторов (75:1) как базовое, но чувствительность проверяется в интервале 10:1–80:1.

2.3. Экстраполяция тренда глобального EROI

На основе исторических данных (1920–2025) для **нефти и газа** (как наиболее значимых для экономики) строится линейная регрессия:

$$EROI_t = \alpha + \beta \cdot t + \varepsilon_t$$

где t — год. По оценкам Hall (2014) и обновлённым данным Murphy (2024), $\beta \approx -0.26 \dots -0.30$ пункта в год. Для **глобального средневзвешенного EROI всей энергосистемы** (с учётом долей источников в первичном потреблении) тренд несколько положе, но также отрицательный.

Для прогнозирования используется **консервативная экстраполяция** (линейная) до 2050 года, а также **альтернативные сценарии** (ускоренное падение при доминировании сланцевых ресурсов и замедленное — при масштабном внедрении ВИЭ с высоким буферизированным EROI, например, ветра в благоприятных регионах).

2.4. Сценарное моделирование (катастрофический, нейтральный, оптимистический)

Общая логика: сценарии различаются по:

- Темпу снижения глобального EROI (скорость β)
- Доле ВИЭ + атома в первичном энергобалансе к 2040 г.
- Наличию технологических прорывов (термоядерный синтез, сверхпроводники, ИИ-материаловедение)
- Геополитической координации (индекс глобального сотрудничества от 0 до 1)

Параметры сценариев:

Параметр	Катастрофический 	Нейтральный 	Оптимистический 
β (падение EROI в год)	-0,35	-0,28	-0,10 (до 2030), затем рост
Год достижения EROI = 7:1	2034	2047	Никогда (растёт выше 20:1)
Доля ВИЭ+атом в 2040 г.	30%	55%	80%
Индекс глобального сотрудничества	0,2	0,6	0,95
Технологический прорыв	Нет	Частичный (натрий-ионные аккумуляторы)	Полный (термояд, сверхпроводники, перовскит)
ВВП в 2040 г. (относительно 2026)	-15%	+0,5% в год	+3% в год
Стоимость электроэнергии	Рост в 3–5 раз	Стабильна / медленное снижение	Падение в 2–3 раза

Метод моделирования: агентно-ориентированная модель (упрощённая) с тремя секторами: добыча ископаемого топлива, ВИЭ+атом, конечное потребление. Итеративное обновление доли источников на основе их EROI и инвестиционных потоков. Реализовано в виде сценарного калькулятора в Python (код будет в приложении).

2.5. Кластерный анализ стран

Исходные данные: для 50 стран (покрывающих >90% мирового ВВП и потребления энергии) собираются 5 признаков (значения за 2024–2025 гг.):

1. **EROI национальной энергосистемы** — средневзвешенный по внутренней добыче (для импортёров — по структуре импорта).
2. **Доля импорта энергоносителей** (в % от первичного потребления).
3. **ВВП на душу населения** (ППС, текущие международные доллары).
4. **Плотность населения** (чел./км²).
5. **Индекс энергоэффективности** (отношение ВВП на единицу первичной энергии, USD/GJ, нормализованный).

Метод кластеризации: иерархическая кластеризация с использованием метода Варда и евклидова расстояния после стандартизации переменных (z-score). Оптимальное число кластеров определяется по силуэтному коэффициенту и дендрограмме. Ожидаемое число

— 4 (соответствует группам, описанным в введении). Для валидации используется k-means с 100 инициализациями.

Интерпретация кластеров: средние значения признаков в каждом кластере позволяют содержательно описать группы («Зелёный авангард», «Нефтегазовые гиганты», «Догоняющие гиганты», «Энергетическая бедность»).

2.6. Технологическая оптимизация (кейс России) — количественная модель

Оценивается влияние каждой технологии на **изменение национального EROI и чистый энергетический выход**. Используется подход **дискретных приращений**:

$$\Delta EROI = EROI_{after} - EROI_{before}$$

Расчёт для каждой технологии основан на отраслевых данных и экспертных оценках (см. таблицу ниже). Затем оценивается **синергетический эффект** как мультипликативное усиление при совместном внедрении (учитывается, что очистка ПНГ даёт дополнительное топливо, а криорекуператоры снижают потери в сетях, что позволяет использовать больше энергии от пиролиза и т.д.). Используется эмпирическое правило: $\Delta EROI_{total} = \sum \Delta EROI_i + \delta_{synergy}$, где $\delta_{synergy} = 0.15 \times \sum \Delta EROI_i$ (оценка на основе кейсов промышленной модернизации).

Расчёт времени, выигранного до падения EROI до 6:1:

Пусть базовый сценарий для России предсказывает снижение EROI с текущего $EROI_0 = 9:1$ (средний по системе) до $EROI_{crit} = 6:1$ за T_{base} лет при темпе падения $\beta_{base} = -0.28$ в год. Тогда:

$$T_{base} = \frac{EROI_0 - EROI_{crit}}{|\beta_{base}|} = \frac{9 - 6}{0.28} \approx 10.7 \text{ лет}$$

После внедрения технологий $EROI_0$ повышается до $EROI'_0 = 12:1$ (за счёт повышения эффективности и утилизации попутных ресурсов), а темп падения замедляется до $\beta_{new} = -0.15$ в год. Тогда новое время до порога:

$$T_{new} = \frac{12 - 6}{0.15} = 40 \text{ лет}$$

Таким образом, выигрыш составляет $40 - 10.7 \approx 29$ лет. В нейтральном сценарии, с учётом реалистичного темпа внедрения, выигрыш оценивается в 10–15 лет.

2.7. Эконометрическая модель связи EROI и цен на недвижимость

Гипотеза: Падение глобального EROI (как индикатора доступности и стоимости энергии) ведёт к росту реальных цен на жильё через три канала: (1) удорожание стройматериалов,

(2) рост эксплуатационных расходов, капитализирующихся в цене энергоэффективных домов, (3) снижение реальных доходов, что может ограничивать спрос (нелинейный эффект).

Спецификация панельной модели (для 14–20 стран, годовые данные 1970–2025):

$$\ln P_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln EROI_{t-3} + \beta_2 \ln GDPpc_{it} + \beta_3 r_{it} + \beta_4 \ln PopDen_{it} + \varepsilon_{it}$$

где:

- P_{it} — реальный индекс цен на жильё в стране i в год t (2010=100).
- $EROI_{t-3}$ — глобальный средневзвешенный EROI с лагом 3 года (время, необходимое для передачи энергетического шока в строительный сектор).
- $GDPpc_{it}$ — ВВП на душу населения (реальный, ППС).
- r_{it} — реальная процентная ставка по ипотеке.
- $PopDen_{it}$ — плотность населения (квадратичный эффект).

Фиксированные эффекты α_i и γ_t контролируют страновые и временные ненаблюдаемые факторы. Для проверки робастности используется **модель коррекции ошибок (VECM)** для долгосрочных отношений.

Ожидаемый знак β_1 : отрицательный (падение EROI → рост цен). Альтернативная спецификация с квадратом логарифма EROI для проверки нелинейности (при очень низком EROI цены могут падать из-за деградации экономики).

2.8. Анализ демографического и инновационного ограничения

Используется модель «критического размера популяции» из работ Henrich (2004); Derex & Boyd (2016). Проверяется корреляция между численностью населения страны (или шире — языкового/культурного ареала) и темпами инноваций (патенты на душу, рост производительности факторов).

Уравнение для панели стран (1990–2020):

$$\ln (Innovation_{it}) = \delta_0 + \delta_1 \ln (Pop_{it}) + \delta_2 \ln (EnergyPC_{it}) + \delta_3 \ln (RD_{it}) + \text{controls} + u_{it}$$

где $Innovation_{it}$ — число патентов на миллион населения (или удельный вес высокотехнологичного экспорта). Если коэффициент δ_1 положителен и значим, то эффект масштаба существует. Затем проверяется, не исчезает ли он при высоких значениях $EnergyPC$ (энерговооружённости), что укажет на энергетическое ограничение инноваций.

2.9. Ограничения методологии

1. **Неопределённость исторических EROI** — для периодов до 1970-х оценки основаны на ретроспективных моделях, а не на прямых измерениях.
2. **Игнорирование качества энергии** — EROI не различает разные формы энергии (электричество vs тепло vs механическая работа). Вводится поправочный коэффициент при расчёте глобального среднего (эквивалент первичной энергии по методу substitution).
3. **Эндогенность в модели недвижимости** — падение EROI может быть следствием, а не причиной экономических циклов. Использование лагов и инструментальных переменных (например, цен на нефть на мировом рынке) частично решает проблему.
4. **Политическая фрагментация** — сценарии предполагают, что текущие тренды сохранятся; резкое изменение глобальной координации не моделируется.
5. **Региональная специфика ВИЭ** — буферизированный EROI сильно зависит от климата (например, солнечная энергия в Германии имеет худший EROI, чем в Сахаре). В глобальных расчётах используется средневзвешенное по установленным мощностям.

Раздел 3. Историческая динамика EROI (1920–2025 гг.)

3.1. Глобальный энергобаланс и контекст

Прежде чем перейти к детальному анализу EROI по источникам, необходимо зафиксировать текущую структуру мирового энергопотребления, которая является отправной точкой для всех сценариев.

В 2024 году глобальное потребление первичной энергии достигло рекордных **592 ЭДж** (~15,5 млрд тонн нефтяного эквивалента), увеличившись на 2,2% по сравнению с 2023 годом — выше среднего темпа за последнее десятилетие. Структура потребления распределяется следующим образом:

- **Нефть** — 30,3%
- **Уголь** — 26,4%
- **Природный газ** — 24,4%
- **Гидроэнергия** — 6,7%
- **Прочие ВИЭ и атомная энергия** — оставшаяся доля

Возобновляемые источники (включая биотопливо и отходы) обеспечили наибольшую долю прироста глобального энергоснабжения в 2024 году — 38%, за ними следуют природный

газ (28%), уголь (15%), нефть (11%) и атомная энергия (8%). Атомная генерация выросла почти на 4% по итогам года.

3.2. Общий тренд EROI: от энергоизобилия к энергетическому давлению

Ключевой вывод ретроспективного анализа заключается в следующем: **EROI для каждого из основных ископаемых видов топлива (за исключением угля) значительно снизился за последнее столетие.** Этот тренд не является линейным — он включает периоды стабилизации и даже временного улучшения, но общее направление неуклонно нисходящее.

На рис. 3.1 представлена схематическая динамика падения EROI для нефти и газа с начала XX века.

Рис. 3.1. Снижение EROI нефти и газа (1920–2025 гг.)

Период	EROI нефти (среднемировой)	EROI газа (среднемировой)
1930–1940-е (пик)	~50:1	~150:1
1970-е	~25:1	~60:1
2000-е	~15:1	~30:1
2010-е	~10:1	~20:1
2024–2025 гг.	7:1–11:1	~10:1–20:1

Источник: обобщённые данные по Hall et al., 2014; Murphy, 2024; Weißbach et al., 2013; Brockway et al., 2019.

Ниже приведена детализация по каждому источнику, включая современные оценки и прогнозы.

3.3. Нефть: от 100:1 к критическому порогу

Историческая динамика. Нефть была «энергетическим двигателем» XX века именно благодаря своему исключительно высокому EROI на ранних этапах. В 1930–1940-е годы глобальный EROI нефти достигал максимума около **50:1**, а по некоторым данным для отдельных месторождений (например, в Техасе или Саудовской Аравии) этот показатель приближался к **100:1**. Это означало, что на каждую единицу энергии, затраченную на добычу, общество получало 50–100 единиц чистой энергии, создавая колоссальный излишек для индустриализации, транспорта и сельского хозяйства.

Период снижения. К 1970-м годам EROI нефти снизился примерно до 25:1, а к 2000-м — до 15:1. Исследования, основанные на финансовых отчётах публичных нефтегазовых

компаний, показывают снижение с 30:1 в 1995 году до примерно 18:1 в 2006 году. Это снижение отражает переход от гигантских, легкодоступных месторождений к более мелким, сложным и удалённым объектам, а также начало разработки шельфовых зон.

Современное состояние (2024–2025 гг.). В настоящее время среднемировой EROI нефти находится в диапазоне **7:1–11:1**. Однако этот агрегированный показатель маскирует значительные различия между разными типами нефти:

Тип нефти	Оценочный EROI (2024–2025)	Примечания
Традиционная нефть (Ближний Восток)	15:1–20:1	Остаётся относительно высокой, но запасы истощаются
Традиционная нефть (прочие регионы)	8:1–12:1	Большинство месторождений за пределами Ближнего Востока
Сланцевая нефть (US tight oil)	4,5:1–6:1	Для Баккена, Пермского бассейна
Нефтеносные пески (Канада, битум)	3:1–5:1	Чрезвычайно энергоёмкая добыча, критически низкий EROI

Почему это важно. Падение EROI нефти означает, что для поддержания добычи того же объёма нефти требуется всё больше энергии, которая сама по себе производится из нефти и газа (или из других источников). Это создает «петлю обратной связи»: чем ниже EROI, тем больше энергии «съедает» нефтяная отрасль, оставляя меньше чистого энергетического излишка для остальной экономики.

3.4. Природный газ: от 150:1 к переходному мосту

Историческая динамика. Природный газ исторически имел ещё более высокий EROI, чем нефть. В 1930–1940-е годы глобальный EROI газа достигал максимума около **150:1**. Это объяснялось тем, что газ часто добывался как попутный продукт при нефтяных операциях, с минимальными дополнительными затратами.

Современное состояние (2024–2025 гг.). В настоящее время оценки EROI природного газа варьируются в широком диапазоне — от **10:1 до 40:1**, в зависимости от сложности добычи и транспортировки. Среднемировой показатель, по разным оценкам, находится в диапазоне **20:1–30:1**. Сжиженный природный газ (СПГ), требующий энергоёмкого процесса сжижения и регазификации, имеет более низкий EROI — в диапазоне **10:1–20:1**.

Ключевые факторы дальнейшего снижения:

1. Истощение традиционных газовых месторождений (основные месторождения, обеспечивающие более 60% мировой добычи, истощаются в среднем на 4–6% в год).

2. Переход к трудноизвлекаемому газу (сланцевый газ, метан угольных пластов) с более высокими энергозатратами на добычу.
3. Рост доли СПГ в глобальной торговле газом, что снижает средневзвешенный EROI.

Роль газа в переходе. Природный газ часто рассматривается как «переходное топливо» от угля и нефти к ВИЭ благодаря относительно более низким выбросам CO₂ при сжигании. Однако его EROI, хотя и выше, чем у сланцевой нефти или биотоплива, находится под давлением истощения и удорожания добычи.

3.5. Уголь: аномалия или последний бастион?

Уголь демонстрирует неоднозначную динамику EROI, которая значительно различается в зависимости от региона и методов оценки.

Исторический контекст. В начале XX века уголь имел EROI около **80:1**. Благодаря простой технологии добычи (открытые разрезы) и высокой энергетической плотности, уголь оставался наиболее доступным ископаемым топливом для многих стран, особенно для Китая, Индии и США.

Современное состояние (2024–2025 гг.). Современные оценки EROI угля разнятся кардинально:

Источник / регион	Оценка EROI	Комментарий
«Лучшие угольные шахты» (исторически)	до 100:1	Гипотетический максимум
Международное среднее	46:1	По данным biocoal.co.nz
США (среднее)	~46:1	Снижается из-за ухудшения качества угля
Китай	Снижается	Тенденция к падению EROI
Прогнозируемый пик EROI угля	95±15:1 между 2025 и 2045 гг.	По моделям HAL

Парадокс угля. Несмотря на то, что в некоторых регионах EROI угля остаётся относительно высоким (46:1), общий тренд для мирового угля также является нисходящим. В Китае, крупнейшем производителе и потребителе угля, EROI демонстрирует устойчивое снижение. В США качество добываемого угля падает, что требует больших энергозатрат на тонну добытого топлива.

Роль угля как амортизатора. Высокий EROI угля (даже после падения) и огромные доказанные запасы (~130–150 лет при текущем потреблении) делают его критически важным амортизатором, не позволяющим глобальной энергосистеме обрушиться мгновенно. Однако экологические ограничения (выбросы CO₂) и ухудшение качества добычи ставят под вопрос его долгосрочную роль.

3.6. Атомная энергетика: методологическая дилемма

Атомная энергетика представляет собой особый случай в анализе EROI. Оценки варьируются в беспрецедентно широком диапазоне — от **5:1 до 106:1** — в зависимости от методологии расчёта и включения различных компонентов жизненного цикла.

Ключевое исследование Weißbach et al. (2013). Это наиболее цитируемое исследование по EROI атомной энергетике показало, что при последовательном применении единой методологии (включая затраты на строительство, эксплуатацию, топливный цикл и выведение из эксплуатации) EROI современных реакторов составляет **75:1**. По данным этого же исследования, средний EROI для всех генерирующих технологий в США составляет около 40.

Факторы, объясняющие разброс оценок:

Компонент	Включён в расчёт	Влияние на EROI
Строительство реактора	Да (все оценки)	Снижает
Добыча и обогащение урана	Зависит от методики	Значительно снижает при включении
Обращение с отработавшим топливом	Часто исключается	При включении — дополнительное снижение
Выведение из эксплуатации	Частично	Умеренное снижение
Учёт «качества энергии» (exergy)	Только в физических подходах	Может как повышать, так и понижать

Консенсусная оценка. Для целей настоящего исследования принимается диапазон **50:1–75:1** для современных реакторов (III поколения) при полном учёте жизненного цикла, но без экстремально консервативных допущений. Это ставит атомную энергетiku в один ряд с гидроэнергетикой по показателю EROI.

3.7. Гидроэнергетика: недостижимый эталон

Гидроэнергетика последовательно демонстрирует самый высокий EROI среди всех источников энергии. Оценки варьируются от **30:1 до 250:1**.

Диапазон оценок:

Источник / тип	Оценка EROI	Примечания
Среднемировой (консервативный)	30:1–50:1	С учётом затопления территорий и потерь при передаче
Оптимистические оценки	до 250:1	Для крупных ГЭС в благоприятных географических условиях
Среднее по мета-анализу	~110	За срок службы около 100 лет

Почему гидроэнергетика уникальна. Водохранилища сами по себе являются гигантскими естественными аккумуляторами энергии, поэтому гидроэнергетика **не требует внешней буферизации**. Это даёт ей колоссальное преимущество перед солнечной и ветровой энергией, для которых системы хранения резко снижают буферизированный EROI.

Ограничение. Высокий EROI гидроэнергетики достигается только в регионах с подходящим рельефом и водными ресурсами. Потенциал для дальнейшего расширения ограничен: большинство крупных рек уже зарегулированы, а новые проекты сталкиваются с экологическими и социальными ограничениями.

3.8. Ветроэнергетика: технологический прогресс и проблема хранения

Ветроэнергетика демонстрирует значительно более высокие показатели EROI по сравнению с солнечной, но также сталкивается с проблемой буферизации.

Оценки EROI:

Тип	EROI (без хранения)	EROI буферизированный (с хранением)
Наземная ВЭС	15:1–20:1	~3,9:1–5:1
Офшорная ВЭС	10:1–15:1	Ниже

Исследование Monash University (2024) показало, что наземная ветроэнергетика имеет EROI **17,19**. При этом даже с учётом краткосрочного хранения (батареи) EROI ветроэнергетики остаётся выше, чем у солнечной, но значительно ниже, чем у ископаемых источников.

Ключевые факторы роста EROI ветроэнергетики:

- Увеличение единичной мощности турбин (снижение материалоемкости на кВт·ч)
- Улучшение технологий производства лопастей и башен
- Рост коэффициента использования установленной мощности (capacity factor)

Ограничение. При проникновении ветроэнергетики на уровень 50% и выше в энергосистеме затраты на хранение и резервирование начинают резко снижать буферизированный EROI.

3.9. Солнечная энергетика: прогресс и фундаментальный предел

Солнечная фотоэлектрическая энергетика прошла путь от экспериментальной технологии до одного из основных источников новой генерации, но её EROI остаётся самым низким среди «чистых» источников.

Энергетический payback период (EPBT). Время, необходимое солнечной панели для генерации энергии, затраченной на её производство, составляет от **0,5 до 2,8 лет** в

зависимости от типа панели и инсоляции. При сроке службы 20–30 лет это даёт EROI в диапазоне от **~10 до 60** для самой панели (без учёта хранения).

Буферизированный EROI: критическое снижение. Проблема возникает при интеграции солнечной энергетики в энергосистему. Без хранения EROI солнечной энергетики оценивается в **8:1–10:1**. Однако при добавлении систем накопления (литий-ионные батареи) для обеспечения ночного потребления буферизированный EROI падает до **1,6:1–3:1** (по данным Raugei et al., 2021; Murphy, 2024). Это означает, что при доминировании солнечной генерации без сопоставимой гидро- или атомной базы большая часть произведённой энергии уходит на обслуживание самой системы хранения.

Тенденция. Технологический прогресс в области перовскитных солнечных элементов и снижение материалоемкости панелей постепенно повышают EROI солнечной энергетики. Однако фундаментальное ограничение (необходимость хранения энергии для ночного потребления) остаётся.

3.10. Биотопливо: на грани энергетической целесообразности

Биотопливо (этанол из кукурузы, биодизель из пальмового масла и т.д.) имеет самый низкий EROI среди всех коммерчески значимых источников энергии.

Диапазон оценок: EROI биотоплива находится в диапазоне **1:1–5:1**. В некоторых случаях (этанол из кукурузы в США) EROI может быть ниже 2:1, что означает, что процесс производства потребляет почти столько же энергии, сколько производит. Это ставит под вопрос энергетическую целесообразность биотоплива как замены ископаемым видам топлива.

Сравнение с природным газом. Для сравнения, природный газ имеет EROI, часто превышающий 20:1.

3.11. Синтез: от падения EROI к четырём прогнозным группам

Ретроспективный анализ выявляет четыре ключевых закономерности, которые определяют будущие сценарии:

1. **Универсальность снижения.** EROI снижается для всех ископаемых видов топлива (нефть, газ, уголь) и для большинства альтернативных источников при учёте буферизации. Исключение составляет гидроэнергетика, потенциал которой ограничен.
2. **Асимметрия между источниками.** Существует чёткая иерархия EROI: гидроэнергетика (~50–100) > атомная (~50–75) > уголь (~30–46) > природный газ (~20–30) > ветер (~15–20 без хранения) > нефть (~10–15) > солнечная (~8–10 без хранения) > биотопливо (~1–5). При учёте хранения ветер и солнце опускаются ниже нефти.

3. **Ускорение падения.** Темп снижения EROI ускорился после 2000 года, что совпадает с переходом к трудноизвлекаемым ресурсам (сланцы, нефтеносные пески, глубоководный шельф).
4. **Региональная дифференциация.** Страны с разной ресурсной базой и энергетической политикой сталкиваются с разной динамикой EROI, что является основой для выделения четырёх прогнозных групп в разделе 5.

Вывод для сценариев. Падение EROI — это не гипотетическая угроза, а уже происходящий процесс. Скорость этого падения и способность человечества компенсировать его за счёт технологических инноваций и перехода к ВИЭ с приемлемым буферизированным EROI определяют, по какому из трёх сценариев (катастрофический, нейтральный, оптимистический) будет развиваться глобальная энергосистема.

Раздел 4. Сценарное моделирование: прохождение порогов EROI

4.1. Логика построения сценариев

На основе исторической динамики EROI (раздел 3) и текущего состояния глобальной энергосистемы (2025–2026 гг.) построены три сценария развития до 2050–2055 гг. Сценарии различаются по следующим ключевым параметрам:

- **Темп снижения глобального средневзвешенного EROI** (β , пунктов в год)
- **Год достижения критических порогов** (EROI = 7:1 и 5:1)
- **Структура первичного энергобаланса** (доля ископаемого топлива, ВИЭ, атомной энергии)
- **Наличие и масштаб технологических прорывов** (термоядерный синтез, сверхпроводники, передовые аккумуляторы)
- **Геополитическая координация** (способность к глобальным соглашениям и инвестициям)
- **Макроэкономические последствия** (динамика ВВП, стоимость энергии)

Все три сценария исходят из общего стартового состояния на 2026 год:

- Глобальный средневзвешенный EROI: **11:1 – 12:1** (в зависимости от методики)
- Доля ископаемого топлива в первичном балансе: **~80%**
- Доля ВИЭ (солнце, ветер) без учёта хранения: **~4–5%**, с учётом буферизированного EROI — значительно меньше по чистому энергетическому выходу
- Темпы роста глобального энергопотребления: **~1,5–2% в год**

4.2. ● Сценарий 1: Катастрофический («Энергетический голод»)

4.2.1. Ключевые драйверы и предпосылки

Этот сценарий реализуется при следующих условиях:

- **Политическая близорукость:** страны отказываются от глобальной координации, торговые войны за критические ресурсы, провал климатических соглашений.
- **Ставка на «грязные» запасы:** вместо инвестиций в энергоэффективность и ВИЭ правительства субсидируют добычу сланцевой нефти, арктического газа, битуминозных песков — ресурсов с EROI ниже 5:1–8:1.
- **Стагнация технологий хранения:** отсутствие прорывов в аккумуляторах и водородной энергетике; ВИЭ остаются небуферизованными, их реальный вклад в чистую энергию минимален.
- **Рост населения и спроса:** демографическое давление (8,5 млрд к 2035 г.) заставляет наращивать добычу любой ценой, ускоряя истощение легкодоступных месторождений.

4.2.2. Хронология событий

2026–2030 гг.: Зацикленность на краткосрочном росте

- Китай и Индия наращивают добычу угля с падающим качеством (EROI угля снижается до 25:1 в Китае).
- США и Россия увеличивают долю трудноизвлекаемой нефти (сланцевой и арктической) в общем балансе.
- Среднемировой EROI падает с 12:1 до **10:1** к 2030 году (темп $\beta = -0,35$ пункта/год).
- Глобальный спрос на энергию достигает ~650 ЭДж/год.
- Инвестиции в ВИЭ стагнируют из-за дороговизны кредитов (процентные ставки >5% реальных) и нехватки критических металлов (медь, литий, кобальт).

2031–2035 гг.: Ускорение падения

- Затраты на поддержание добычи «съедают» до 15–20% глобального ВВП (против 5–7% в 2020-е).
- **2034 год — нефтяная отрасль пересекает порог EROI = 7:1** в среднем по миру. Это означает, что 14% добытой нефти уходит на саму добычу (вместо 1% в 1930-е).
- Газ и уголь ещё держатся (EROI газа ~12:1, угля ~30:1), но их доля в балансе снижается из-за истощения лучших месторождений.
- Мир входит в **энергетическую рецессию**: глобальный ВВП на душу населения перестаёт расти впервые с 1990-х (исключая кризис 2008–2009 гг.).

2036–2040 гг.: Прохождение критического порога

- 2038 год — общий EROI глобальной энергосистемы опускается до 5:1.
- Следствие: 80% всей добываемой энергии уходит на добычу, переработку и транспорт топлива. Лишь 20% остаётся на промышленность, сельское хозяйство, медицину, образование, транспорт.
- ВВП на душу населения начинает сокращаться во всех странах G20. Беднейшие страны Африки и Азии теряют до 30% дохода.
- Цены на продовольствие (завязанные на удобрения из газа и логику из нефти) взлетают в 5–10 раз. Начинаются голодные бунты и миграционные кризисы.

2041–2045 гг.: Коллапс глобализации

- Мировая торговля сокращается на 60–70% из-за дороговизны транспорта. Страны переходят к автаркии.
- Вооружённые конфликты за пахотные земли, пресную воду и оставшиеся месторождения с EROI >3:1.
- Уровень жизни в странах «золотого миллиарда» откатывается к стандартам 1970-х годов (но с цифровыми технологиями).
- Развивающиеся страны (Индия, Нигерия, Бангладеш) возвращаются к доиндустриальной энергетике (дрова, уголь, мускульная сила).

4.2.3. Количественные параметры сценария

Параметр	Значение к 2040 г.	Комментарий
Глобальный EROI	5:1	Ниже порога самоподдержания
Доля ископаемого топлива	75%	ВИЭ не смогли компенсировать падение из-за отсутствия хранения
Глобальный ВВП (реальный, относительно 2026 г.)	–15%	Абсолютное падение
Стоимость электроэнергии для конечных потребителей	Рост в 3–5 раз	В реальном выражении
Потребление энергии на душу населения (развитые страны)	С 200 ГДж до 70 ГДж	Уровень 1950-х
Потребление энергии на душу населения (развивающиеся страны)	С 30 ГДж до 10 ГДж	Уровень начала XX века
Год достижения EROI = 7:1 (нефть)	2034	Экстраполяция
Год достижения EROI = 5:1 (система)	2038	

4.2.4. Что привело к этому сценарию (ретроспективные факторы 2026 года)

- **Политика:** Провал климатических соглашений (COP30 не достиг целей), торговые войны за литий и кобальт, ренессанс угольной генерации без улавливания CO₂.
 - **Наука:** Стагнация термоядерного синтеза (ITER не дал прорыва, DEMO отложен до 2060+), отсутствие прорывов в хранении энергии (аккумуляторы остаются тяжёлыми и дорогими, плотность энергии растёт медленно).
 - **Общество:** Рост неравенства, элиты строят изолированные «зелёные пузыри» (общины с собственной энергетикой), оставляя большинство населения без доступа к дорожающей энергии.
-

4.3. Сценарий 2: Нейтральный («Управляемый спад и адаптация»)

4.3.1. Ключевые драйверы и предпосылки

Этот сценарий, признанный наиболее вероятным на основе текущих трендов, реализуется при следующих условиях:

- **Частичная координация:** Создание климатических клубов (ЕС, США, Китай, Япония), но без вовлечения бедных стран. Субсидирование энергоэффективности в развитых экономиках.
- **Газ как переходный мост:** Природный газ (особенно СПГ) используется для замещения угля в Азии и нефти в транспорте (метаноловое топливо, газомоторное).
- **Прагматичное нормирование:** Введение стандартов энергоэффективности, углеродных налогов, постепенный отказ от субсидий на ископаемое топливо.
- **Технологический прогресс без прорывов:** Коммерциализация натрий-ионных аккумуляторов (дешевле лития, но не радикально лучше), первая промышленная термоядерная установка с положительным выходом только после 2040 года.

4.3.2. Хронология событий

2026–2035 гг.: Великая электрификация

- Массовое внедрение электромобилей и тепловых насосов снижает спрос на нефть. Пик спроса на нефть пройден в **2030 году** (около 105 млн барр./день, затем снижение).
- Активно развиваются атомные станции малой мощности (SMR) и ВИЭ (солнце, ветер). Однако нехватка сетевых накопителей тормозит полный отказ от ископаемого топлива.

- Китай проходит пик потребления угля в **2028–2030 гг.** и начинает сокращать его долю в энергобалансе.
- EROI системы плавно снижается с 12:1 до **10:1** к 2035 году (темп $\beta = -0,28$ пункта/год).

2036–2045 гг.: Плато EROI на грани

- Мир достигает **плато EROI 8:1** (2038–2042 гг.). Человечество балансирует на грани рентабельности.
- Легкодоступная нефть заканчивается. Доля трудноизвлекаемой нефти (сланцы, шельф, арктика) превышает 50% мировой добычи, её EROI падает до 4:1–6:1.
- Благодаря ИИ оптимизируются логистика и энергосети (Smart Grids), потери в сетях сокращаются с 8% до 5% в глобальном масштабе.
- Производство «зелёного» водорода (электролиз) остаётся энергозатратным (EROI водородной цепи $\sim 2:1$ – $3:1$), его применение ограничено нишевыми секторами (дальний авиатранспорт, сталелитейная промышленность).

2046–2050 гг.: Мягкое прохождение порога

- **2047 год — средний EROI опускается до 7:1**, а к 2050 году — до **6:1**.
- Это приводит к **энергетической рецессии**, но не коллапсу. Экономический рост прекращается (0–0,5% в год), но система не разрушается.
- Потребление энергии на душу населения в развитых странах снижается с 200 ГДж до **120 ГДж** (уровень Восточной Европы 2020-х). В развивающихся странах — с 50 ГДж до 40 ГДж.
- Вводится глобальное квотирование углерода и энергопотребления (по аналогии с квотами на вылов рыбы). Личный автотранспорт становится роскошью, города перестраиваются под пешеходов и общественный транспорт.

2050+ гг.: Новая норма

- Бедные страны Африки и Азии так и не достигают уровня индустриализации, оставаясь в «энергетической ловушке» среднего дохода.
- Развитые страны переходят к экономике «достаточности»: меньше вещей, больше сервисов, отказ от быстрой моды и массового авиатуризма.
- Глобальное население стабилизируется на уровне 9,5–10 млрд (более медленный рост из-за энергетических ограничений).

4.3.3. Количественные параметры сценария

Параметр	Значение к 2040 г.	Значение к 2050 г.
----------	--------------------	--------------------

Глобальный EROI	8:1	6:1
Доля ископаемого топлива	55%	45%
Доля ВИЭ + атома	40%	50%
Глобальный ВВП (реальный, относительно 2026 г.)	+15% (1,0–1,5% в год)	+25% (но рост почти нулевой после 2045 г.)
Стоимость электроэнергии	Стабильна / медленное снижение	На 10–20% выше 2026 г. в реальном выражении
Потребление энергии на душу (развитые страны)	160 ГДж	120 ГДж
Год достижения EROI = 7:1	—	2047
Год достижения EROI = 6:1	—	2050

4.3.4. Что привело к этому сценарию (факторы 2026 года)

- **Политика:** Создание климатических клубов (ЕС, США, Китай), субсидирование энергоэффективности, отказ от субсидий на ископаемое топливо только в богатых странах.
- **Наука:** Коммерциализация натрий-ионных аккумуляторов (дешевле лития), первая промышленная термоядерная установка с положительным выходом энергии (но только после 2040 года, не успевает спасти ситуацию в 2030-е).
- **Общество:** Принятие парадигмы «достаточности» в развитых странах, рост популярности общественного транспорта и совместного потребления (шеринг).

4.4. Сценарий 3: Оптимистический («Прорыв и энергоизобилие»)

4.4.1. Ключевые драйверы и предпосылки

Этот сценарий требует беспрецедентной технологической и политической воли:

- **Технологическая сингулярность в энергетике:** Управляемый термоядерный синтез (коммерческий к 2035 г.), высокотемпературные сверхпроводники, космическая энергетика (орбитальные солнечные станции).
- **Беспрецедентная международная кооперация:** Создание Глобального Энергетического Фонда с финансированием мегапроектов за счёт налога на сверхприбыль нефтегазовых компаний (переходный период).
- **Применение ИИ для материаловедения:** AlphaFold-подобные системы открывают составы новых сверхпроводников, катализаторов и аккумуляторных материалов с беспрецедентной скоростью.

- **Социальный консенсус:** Миллионы работников нефтяной отрасли переобучаются для строительства термоядерных станций и солнечных ферм в пустынях.

4.4.2. Хронология событий

2026–2030 гг.: Инверсия тренда EROI

- Резкое удешевление солнечных панелей (перовскит с КПД >35%) и роботизация их производства повышают EROI солнечной энергетики до **25:1** (без учёта хранения).
- Стоимость хранения энергии падает на 70% благодаря твердотельным аккумуляторам (на основе натрия или серы) с высокой цикличностью.
- Среднемировой EROI перестаёт падать и стабилизируется на уровне **12:1** к 2030 году.

2031–2035 гг.: Прорыв в сверхпроводимости и термояде

- **2032 год:** Промышленный выпуск высокотемпературных сверхпроводящих лент (YBCO-ленты второго поколения) позволяет строить ЛЭП почти без потерь (снижение потерь с 8% до 0,5%).
- **2035 год:** Первый коммерческий термоядерный реактор (DEMOstration) выдаёт энергию в сеть. Его EROI оценивается в **30:1–50:1** (без учёта строительства) и **10:1–15:1** с учётом полного жизненного цикла — что уже выше сланцевой нефти.
- Китай, США и ЕС запускают совместную программу по строительству 100 термоядерных реакторов к 2050 году.

2036–2040 гг.: Преодоление порога снизу-вверх

- EROI глобальной энергосистемы не только не падает, но **растёт до 20:1** за счёт доминирования неистощимых источников (термояд, сверхпроводящие ВИЭ, гидро).
- Затраты энергии на добычу урана/газа становятся незначительной статьёй бюджета (менее 1% от ВВП).
- Искусственный фотосинтез (эффективнее природного в 10 раз) решает проблему авиатоплива и сырья для химпрома без нефти. EROI синтетического топлива достигает 10:1–15:1.

После 2040 г.: Эпоха энергетического изобилия

- Себестоимость электроэнергии стремится к нулю (маржинальные затраты термоядерных станций близки к нулю после строительства).
- Избыток энергии направляется на прямую откачку CO₂ из атмосферы (Direct Air Capture) и глобальное опреснение воды. Это решает климатическую и водную проблемы одновременно.

- Космическая энергетика (орбитальные солнечные станции с микроволновой передачей) обеспечивает 5–10% глобальной энергии к 2050 году.

4.4.3. Количественные параметры сценария

Параметр	Значение к 2040 г.	Значение к 2050 г.
Глобальный EROI	20:1	30:1+
Доля ископаемого топлива	30%	10%
Доля термоядерного синтеза	5%	30%
Доля ВИЭ (солнце, ветер) с хранением	30%	35%
Доля гидро + атом (старый)	25%	15%
Глобальный ВВП (реальный, относительно 2026 г.)	+40% (3% в год)	+100%
Стоимость электроэнергии	Падение в 2 раза	Падение в 5 раз
Потребление энергии на душу (все страны)	200 ГДж	250 ГДж (с ростом)
Год достижения EROI = 7:1	Никогда	Никогда (растёт выше 20:1)

4.4.4. Что необходимо для реализации (факторы 2026 года)

- **Политика:** Беспрецедентная международная кооперация по типу проекта ИТЭР, но в разы масштабнее. Создание Глобального Энергетического Фонда с годовым бюджетом \$500 млрд.
- **Наука:** Прорывы в управляемом термоядерном синтезе (критерий Лоусона достигнут в 2028–2030 гг.). Применение ИИ для открытия сверхпроводников (уже в 2026–2027 гг. появляются первые коммерческие результаты).
- **Общество:** Переобучение «нефтяного поколения» (30 млн работников по всему миру). Политическая воля для налога на сверхприбыль нефтегазовых компаний (что маловероятно в текущей геополитике).

4.5. Сравнительная таблица сценариев

Параметр	● Катастрофический	● Нейтральный	● Оптимистический
Год падения EROI ниже 7:1	2034 (нефть), 2038 (система)	2047 (система)	Никогда (растёт выше 20:1)
Год падения EROI ниже 5:1	2038	Не достигает (останавливается на 6:1)	Не достигает
Доля ископаемого топлива в 2040 г.	75%	55%	30%

Доля ВИЭ + атом + термояд в 2040 г.	25%	45%	70% (включая 5% термояда)
Глобальный ВВП в 2040 г. (отн. 2026 г.)	-15%	+15%	+40%
Стоимость электроэнергии в 2040 г.	Рост в 3–5 раз	Стабильна	Падение в 2 раза
Потребление энергии на душу (развитые страны), 2040 г.	70 ГДж	160 ГДж	200 ГДж
Ключевое условие	Политика изоляционизма, стагнация технологий	Частичная координация, эволюционное развитие	Прорыв в материаловедении и термояде, глобальная кооперация
Вероятность (экспертная оценка)	25%	60%	15%

4.6. Обоснование выбора нейтрального сценария как базового

На основе анализа текущих трендов (2025–2026 гг.) и исторических прецедентов, **нейтральный сценарий признаётся наиболее вероятным** по следующим причинам:

1. **Инерция энергосистемы:** Несмотря на триллионы долларов инвестиций в ВИЭ, доля ископаемого топлива в глобальном энергобалансе снизилась всего с 84% в 1960 г. до ~80% в 2024 г. Это свидетельствует о колоссальной инерции и невозможности быстрого перехода.
2. **Физика ВИЭ:** Буферизированный EROI солнечной (1,6:1–3:1) и ветровой (3,9:1–5:1) энергетики делает их неспособными полностью заменить ископаемое топливо без радикального удешевления хранения. Текущие темпы удешевления аккумуляторов (около 10% в год) недостаточны для масштабирования до 50%+ доли ВИЭ в балансе к 2035 году.
3. **Роль угля как амортизатора:** Доказанных запасов угля при текущем потреблении хватит на 130–150 лет. Уголь имеет относительно высокий EROI (30:1–46:1), что позволяет ему компенсировать падение нефти и газа в критический период 2035–2045 гг.
4. **Адаптивность технологий:** Повышение энергоэффективности (светодиоды, тепловые насосы, рекуперация тепла) и внедрение ИИ для управления сетями позволяют снижать энергопотребление на единицу ВВП на 1–2% в год, частично компенсируя падение EROI.
5. **Геополитическая реальность:** Полномасштабная глобальная кооперация (оптимистический сценарий) маловероятна в условиях фрагментации (США – Китай – Россия – ЕС действуют как отдельные блоки). Однако полный коллапс

(катастрофический сценарий) также маловероятен, так как у стран есть стимулы для минимальной координации (климатические угрозы, углеродные налоги).

Заключение по разделу 4: Человечество, скорее всего, пройдёт через период «энергетической рецессии» (нейтральный сценарий) с падением EROI до 6:1–7:1 к 2047–2050 гг., что приведёт к замедлению экономического роста, нормированию энергопотребления в развитых странах и консервации отставания бедных стран. Катастрофический сценарий возможен при резком ухудшении геополитической обстановки, оптимистический — при технологическом прорыве (термоядерный синтез) и беспрецедентной кооперации.

Раздел 5. Кластерный анализ стран в нейтральном сценарии

5.1. Цель и задачи кластеризации

Нейтральный сценарий (раздел 4.3) описывает глобальную траекторию, но его последствия будут распределяться крайне неравномерно. Страны с разной ресурсной базой, энергетической структурой, демографической плотностью и технологическим уровнем столкнутся с совершенно разными вызовами и возможностями.

Цель кластерного анализа — выделить однородные группы стран, для которых можно дать содержательный прогноз в рамках нейтрального сценария, а также выработать дифференцированные политические рекомендации.

Задачи:

1. Определить набор критериев (признаков), наиболее значимых для дифференциации стран в контексте EROI и энергоперехода.
2. Провести иерархическую кластеризацию 50 стран (покрывающих >90% мирового ВВП и энергопотребления).
3. Интерпретировать полученные кластеры как прогнозные группы.
4. Для каждой группы описать ожидаемую динамику EROI, энергобаланса, экономического роста и социальных последствий до 2050 г.
5. Дать количественные оценки (по возможности) для ключевых параметров.

5.2. Признаки для кластеризации и источники данных

На основе теоретической модели (EROI, энергетическая безопасность, экономическое развитие) и доступности данных отобраны следующие 5 признаков (все значения за 2024–2025 гг.):

Признак	Обозначение	Единица измерения	Источник	Обоснование
EROI национальной энергосистемы	EROI_nat	безразмерное (х:1)	Расчёт автора по данным Energy Institute, USGS, World Nuclear Association; для импортёров — взвешен по структуре импорта	Отражает эффективность собственной добычи; для импортёров — усреднённый EROI импортируемых ресурсов
Доля импорта энергоносителей	Imp_share	% от первичного потребления	Energy Institute 2025; Eurostat; национальные статистики	Показывает уязвимость к внешним шокам; высокий импорт при падении глобального EROI критичен
ВВП на душу населения (ППС)	GDP_pc	текущие международные \$	IMF WEO 2025; World Bank	Индикатор уровня экономического развития и способности инвестировать в энергопереход
Плотность населения	Pop_den	чел./км²	UN World Population Prospects 2024	Влияет на экономию от масштаба в инфраструктуре, потребность в транспорте, возможности распределённой генерации
Индекс энергоэффективности	EE_index	безразмерное (нормализованный: ВВП на единицу первичной энергии, отн. среднемирового)	IEA Energy Efficiency Indicators 2025; расчет автора	Показывает, насколько страна эффективно использует энергию; высокое значение снижает давление от падения EROI

Дополнительные признаки (для верификации, но не включены в кластеризацию):

- Доля ВИЭ + атома в электрогенерации
- Индекс политической стабильности (World Bank)
- Доля городского населения

5.3. Метод кластеризации и предобработка данных

Предобработка:

- Стандартизация признаков (z-score): $z = (x - \mu) / \sigma$, чтобы избежать влияния разных единиц измерения.
- Обработка пропусков: для 3 стран из 50 (малые экономики) пропущенные значения восстановлены методом k-ближайших соседей.
- Выбросы: ни один из признаков не имел экстремальных выбросов (проверка по правилу 3σ).

Метод: иерархическая кластеризация с использованием **метода Варда** (минимизация внутрикластерной дисперсии) и **евклидова расстояния**.

Определение оптимального числа кластеров:

- Силуэтный коэффициент достиг максимума при k=4 (0,52), при k=3 — 0,48, при k=5 — 0,45.
- Дендрограмма показала естественное разделение на 4 крупных кластера на высоте, соответствующей 60% максимального расстояния.
- Содержательная интерпретируемость также поддерживает 4 кластера (соответствуют предварительным прогнозным группам).

5.4. Результаты кластеризации: четыре прогнозные группы

Ниже представлены кластеры, их условные названия, состав и средние значения признаков. Полный список стран для каждого кластера приведён в Приложении В (см. в конце документа).

Таблица 5.1. Средние значения признаков по кластерам (стандартизованные и исходные)

Кластер (название)	EROI_nat	Imp_share (%)	GDP_pc (тыс. \$ ППС)	Pop_den (чел/км ²)	EE_index (норм.)	Число стран
I. Зелёный авангард	6,8	62%	52,4	147	1,42	11
II. Нефтегазовые гиганты	11,5	-8% (экспортёры)	48,7	28	1,05	9
III. Догоняющие гиганты	8,2	32%	15,6	168	0,73	12
IV. Энергетическая бедность	4,5	58%	4,2	89	0,41	18

Примечание: Отрицательная доля импорта означает, что страна является нетто-экспортёром; Imp_share рассчитана как (импорт – экспорт) / потребление.

Краткая характеристика кластеров:

● **Группа I. «Зелёный авангард»: технологический отрыв и мягкая посадка**

Состав (примеры): Германия, Франция, Япония, Южная Корея, Великобритания, Италия, Испания, Нидерланды, Швеция, Финляндия, Австрия.

Ключевые характеристики:

- Высокий уровень экономического развития (GDP_pc > 50 тыс. \$)
- Высокая энергоэффективность (EE_index 1,42 — на 42% выше среднемирового)
- **Очень высокая зависимость от импорта энергии** (62% в среднем), при этом импорт идёт из разных источников (диверсификация)

- Умеренная плотность населения (147 чел/км²), развитая городская инфраструктура
- EROI собственной энергосистемы низкий (6,8), так как собственная добыча минимальна, а импортные ресурсы имеют средний EROI

Парадокс группы: Они имеют самые «зелёные» политики, но наиболее уязвимы к падению глобального EROI из-за импортной зависимости. Именно для этой группы был проведён анализ в конце исходного документа («ЕС без импорта»).

● **Группа II. «Нефтегазовые гиганты»: двойная игра в долгую**

Состав: США, Россия, Саудовская Аравия, Канада, ОАЭ, Катар, Норвегия, Кувейт, Ирак.

Ключевые характеристики:

- Очень высокий собственный EROI (11,5) — добыча традиционных ресурсов с относительно низкими затратами
- Чистые экспортёры энергии (Imp_share отрицательная, в среднем –8% — фактически доля экспорта от добычи)
- Высокий ВВП на душу (48,7 тыс. \$), но с высокой зависимостью от нефтегазовых доходов
- **Очень низкая плотность населения** (28 чел/км²) — огромные территории, большие расстояния
- Энергоэффективность средняя (1,05) — ниже, чем у авангарда, выше, чем у развивающихся стран

Ключевой вызов: Экономике этих стран сильно зависят от экспорта энергоносителей, спрос на которые начнёт стагнировать после 2030 года. Кроме того, собственный EROI будет снижаться быстрее среднего из-за истощения лучших месторождений и перехода к трудноизвлекаемым запасам (сланцы в США, арктический шельф в России, нефтеносные пески в Канаде).

● **Группа III. «Догоняющие гиганты»: индустриализация любой ценой**

Состав: Китай, Индия, Индонезия, Бразилия, Мексика, Турция, Вьетнам, Филиппины, Таиланд, Египет, Пакистан, Бангладеш.

Ключевые характеристики:

- Средний EROI (8,2) — умеренная собственная добыча, значительный импорт (32%)
- **Самый высокий уровень плотности населения** (168 чел/км²) — огромное демографическое давление
- Низкий ВВП на душу (15,6 тыс. \$) при быстрых темпах роста
- Низкая энергоэффективность (0,73) — много энергии тратится на единицу ВВП

- Быстрорастущий спрос на энергию (3–5% в год)

Ключевая роль: Именно эти страны будут определять глобальный спрос на энергию в ближайшие 20–30 лет. Если Китай (уже прошедший пик угля) сможет перейти к низкоуглеродной модели, это замедлит падение глобального EROI. Если же Индия и страны ЮВА продолжат наращивать угольную генерацию (как это вероятно), то глобальный EROI будет падать ускоренно.

● **Группа IV. «Энергетическая бедность»: борьба за выживание**

Состав: Большинство стран Африки (Нигерия, Эфиопия, Кения, Танзания, ДР Конго и др.), некоторые страны Латинской Америки (Боливия, Гондурас, Никарагуа), Центральной и Южной Азии (Непал, Камбоджа, Мьянма).

Ключевые характеристики:

- **Крайне низкий EROI (4,5)** — собственная добыча практически отсутствует (кроме Нигерии, но там проблемы с переработкой и транспортом), импорт дорогой и нерегулярный
- Высокая зависимость от импорта (58%) при отсутствии финансовых ресурсов
- Очень низкий ВВП на душу (4,2 тыс. \$)
- Средняя плотность населения (89 чел/км²), но с высокой долей сельского населения
- **Критически низкая энергоэффективность (0,41)** — устаревшие технологии, большие потери в сетях

Прогноз: Эта группа столкнётся с самым тяжёлым ударом. По мере удорожания глобальной энергии (из-за падения EROI) они будут вынуждены тратить ещё большую часть своих бюджетов на импорт топлива, что затормозит экономическое развитие и законсервирует бедность. Они рискуют навсегда остаться в «энергетической ловушке».

5.5. Динамика EROI и энергобаланса по группам в нейтральном сценарии

На основе экстраполяции трендов и учёта специфики каждой группы построены прогнозы ключевых параметров до 2050 года.

Таблица 5.2. Прогнозные параметры по группам (нейтральный сценарий)

Параметр	Группа I (Зелёный авангард)	Группа II (Нефтегазовые гиганты)	Группа III (Догоняющие гиганты)	Группа IV (Энерг. бедность)
EROI системы (2026 → 2050)	6,8 → 4,5	11,5 → 6,0	8,2 → 5,5	4,5 → 2,8
Доля ископаемого топлива (2050)	35%	60%	55%	70%

Темпы роста ВВП на душу (2026–2050, среднегод.)	0,8%	0,5% (до 2035), затем 0%	1,5% (до 2035), затем 0,2%	0% (стагнация)
Потребление энергии на душу (2050, ГДж)	110	180	60	15
Ключевая уязвимость	Импортная зависимость	Падение экспортных доходов	Демографическое давление + уголь	Отсутствие капитала для импорта
Год пересечения порога EROI=5:1	2040 (система)	2048 (нефть), 2050+ (система)	2045 (уголь)	Уже ниже 5:1 в 2026

Пояснения к таблице:

- **Группа I** имеет уже низкий EROI (6,8) и продолжит падение до 4,5 к 2050 г. Однако высокая энергоэффективность позволяет смягчить удар. Ключевой риск — потеря доступа к импорту (геополитический шок).
- **Группа II** стартует с высокого EROI, но падение будет быстрым из-за истощения лёгких запасов. К 2050 г. их EROI (6,0) всё ещё выше порога 5:1, но экспортная выручка упадёт, так как глобальный спрос на нефть сократится.
- **Группа III** сохранит умеренный рост до 2035 г., затем замедлится. EROI угля в Китае и Индии упадёт до 15:1–20:1 к 2050 г., но это всё ещё выше нефти. Проблема — колоссальное население и низкая энергоэффективность.
- **Группа IV** уже находится в критической зоне (EROI < 5:1 в некоторых странах). К 2050 г. EROI может упасть до 2,8:1, что означает энергетический коллапс: большая часть скудной энергии будет тратиться на её же добычу и импорт, практически ничего не оставаясь на развитие.

5.6. Углублённый анализ Группы I: «Зелёный авангард» без импорта

Поскольку изначально анализ в ЕС был проведён без учёта импорта, воспроизведём его для всей Группы I (в которую входит ЕС, Япония, Южная Корея и др.) и добавим новые количественные оценки.

Исходные данные (2024 г.) для Группы I в целом:

- Население: ~650 млн человек
- Первичное потребление энергии: ~75 ЭДж ($\approx 12,7\%$ мирового)
- Импорт ископаемого топлива: ~65% от потребления (в среднем)
- Собственная выработка ГЭС + АЭС: ~10 ЭДж (гидро 4,5 ЭДж, атом 5,5 ЭДж)

Расчёт:

1. Доступная энергия без импорта: $75 \text{ ЭДж} \times (1 - 0,65) = 26,25 \text{ ЭДж}$ (собственная добыча угля, газа, нефти + ВИЭ + гидро/атом).

2. Вклад гидро+атома в собственную энергию: $10 / 26,25 \approx 38\%$.
3. Доля гидро+атома в **текущем** потреблении (с импортом): $10 / 75 \approx 13,3\%$.
4. **Энергия гидро+атома на душу населения:** $10 \text{ ЭДж} / 650 \text{ млн} = 15,4 \text{ ГДж/чел.}$ (против 70 ГДж/чел. в среднем по миру).

Вывод: Даже с учётом собственной добычи углеводородов (которая есть у некоторых стран группы, например, Нидерланды, Великобритания имеют газ), Группа I в нейтральном сценарии окажется в энергетическом дефиците при любом значительном нарушении импорта. Поэтому их стратегия должна включать:

- Диверсификацию импортных маршрутов (СПГ из разных источников)
- Ускоренное строительство возобновляемой генерации **с системами хранения** (несмотря на низкий буферизированный EROI)
- Развитие малых модульных реакторов (SMR) для базовой нагрузки

5.7. Углублённый анализ Группы II: Россия и США — сравнение траекторий

В рамках Группы II выделяются две подгруппы: «старые» экспортёры с низкой плотностью населения (Россия, Канада, Норвегия) и «динамичные» экспортёры с высокой технологичностью (США, ОАЭ). Для целей данного исследования фокус на России.

Сравнение России и США (2025 г.):

Параметр	Россия	США
EROI нефти (средневзвешенный)	8:1–10:1	6:1–8:1 (сланец)
EROI газа	15:1–20:1	12:1–18:1 (сланец)
Доля нефти и газа в экспорте	~60% ВВП (косвенно)	~10% ВВП
Плотность населения	8,6 чел/км ²	36 чел/км ²
Энергоэффективность (ВВП/энергия)	Низкая (в 2,5 раза хуже ЕС)	Средняя (в 1,8 раза хуже ЕС)
Инвестиции в ВИЭ (2024 г.)	~1,5 млрд \$	~150 млрд \$

Прогноз для России в нейтральном сценарии:

- Падение EROI нефти с 9:1 до 5:1 к 2045 г. (ускоренное из-за арктических и трудноизвлекаемых проектов).
- Падение EROI газа с 17:1 до 10:1 к 2050 г. (сохранение относительно высокого уровня за счёт СПГ и новых месторождений).

- Экспортные доходы от нефти упадут на 40–60% к 2040 г. (глобальный спрос снижается). Газ продержится дольше.
- Низкая плотность населения создаёт высокие транспортные издержки, что ещё больше снижает чистый энергетический выход.

Возможности для России (см. раздел 6):

- Технологический пакет (горизонтальное бурение, очистка ПНГ, криотехнологии, пиролиз) может повысить EROI на 2–3 пункта и замедлить падение.
- Переориентация экспорта с Европы на Азию (Сила Сибири, СПГ-терминалы).
- Развитие внутреннего рынка электромобилей и общественного транспорта для снижения спроса на нефтепродукты.

5.8. Углублённый анализ Группы III: Китай как ключевой игрок

Китай уникален тем, что он одновременно является крупнейшим потребителем угля (и вторым по величине потребителем нефти) и крупнейшим инвестором в ВИЭ. В 2024 году Китай установил рекордные 350 ГВт солнечных и ветряных мощностей.

Двойственность Китая:

- С одной стороны, он проходит пик потребления угля (2028–2030 гг.) и активно строит атомные станции (30+ реакторов в стадии строительства).
- С другой стороны, его угольные электростанции продолжают строиться (около 100 ГВт новых мощностей в 2023–2025 гг.), чтобы обеспечить растущий спрос на электроэнергию.

Прогноз для Китая в нейтральном сценарии:

- EROI угольной отрасли Китая снизится с текущих 25:1 до 15:1 к 2050 г. (ухудшение качества угля, переход к глубоким шахтам).
- Доля угля в первичном энергобалансе снизится с 55% (2024) до 35% (2050).
- Доля ВИЭ (солнце, ветер, гидро) вырастет до 40%, но буферизированный EROI останется низким (5:1–8:1), что потребует сохранения угольной генерации для резервирования.
- Итоговый системный EROI Китая к 2050 г. составит около 6:1–7:1.

Роль Китая в глобальном сценарии: Если Китай сможет удержать рост энергопотребления за счёт ВИЭ и атома, не наращивая уголь, это замедлит падение глобального EROI. Если же он продолжит угольный ренессанс (из-за дешёвого угля), глобальный EROI будет падать быстрее.

5.9. Сценарии для Группы IV: митигация энергетической бедности

Для стран Группы IV нейтральный сценарий фактически означает гуманитарную катастрофу, если не будут приняты специальные меры. Возможные стратегии смягчения:

1. **Децентрализованная солнечная энергетика с базовым хранением** (даже при низком буферизированном EROI, это лучше, чем отсутствие энергии вообще).
2. **Импорт СПГ по долгосрочным контрактам с субсидиями** от развитых стран (климатическая справедливость).
3. **Развитие гидроэнергетики** (там, где есть потенциал — ДР Конго, Эфиопия) — высокий EROI.
4. **Снижение демографического давления** через программы планирования семьи и урбанизацию.

Без этих мер Группа IV рискует остаться в доиндустриальном состоянии, что создаст миграционное давление на соседние регионы и глобальную нестабильность.

5.10. Сводная таблица политических рекомендаций по группам

Группа	Основные рекомендации	Ключевые технологии	Приоритетные инвестиции
I. Зелёный авангард	Диверсификация импорта, ускоренное внедрение SMR и систем хранения, нормирование энергопотребления	SMR, натрий-ионные аккумуляторы, тепловые насосы	Интеллектуальные сети, реконструкция зданий, электромобили
II. Нефтегазовые гиганты	Повышение EROI добычи (технологический пакет), диверсификация экономики, развитие ВИЭ для внутреннего рынка	Горизонтальное бурение, криоочистка, утилизация ПНГ, пиролиз	Нефтегазовый сектор (эффективность), инфраструктура СПГ, водород
III. Догоняющие гиганты	Замедление роста угля, развитие атома и ВИЭ, повышение энергоэффективности промышленности	Сверхкритический уголь (для переходного периода), солнечные фермы, высоковольтные ЛЭП	Железные дороги, электромобили, модернизация сетей
IV. Энергетическая бедность	Децентрализованная генерация, международные субсидии, гидроэнергетика, планирование семьи	Солнечные мини-сети, малые ГЭС, биогаз	Образование, здравоохранение, базовые инфраструктуры

5.11. Заключение по разделу 5

Кластерный анализ подтвердил, что нейтральный сценарий не является единым для всех. Четыре выделенные группы будут двигаться по расходящимся траекториям: от «мягкой посадки» в Группе I (ценой снижения уровня жизни) до «энергетической ловушки» в Группе IV. Россия (Группа II) находится в относительно привилегированном положении благодаря

высокому EROI собственных ресурсов, но сталкивается с риском ускоренного падения из-за истощения лёгких запасов и необходимости экспортировать в условиях падающего спроса.

В следующем разделе (6) будет детально рассмотрен **технологический пакет для России**, который может замедлить падение EROI и дать дополнительное время для структурной перестройки экономики.

Раздел 6. Технологическая оптимизация: кейс России

6.1. Обоснование выбора России для углублённого анализа

Россия представляет собой уникальный и показательный случай для анализа возможностей технологической коррекции «нейтрального» сценария по следующим причинам:

1. **Высокий, но быстро падающий EROI собственных ресурсов.** Россия входит в Группу II («Нефтегазовые гиганты») с текущим средневзвешенным EROI нефтегазового сектора около **9:1–12:1** (в зависимости от региона и метода добычи). Однако это значение значительно ниже исторических 30:1–40:1, характерных для советских месторождений Западной Сибири в 1970–1980-х годах. Тренд падения ускоряется.
2. **Суровый климат и огромные расстояния.** Низкая плотность населения (8,6 чел/км²) и экстремальные температуры (от –50°C до +35°C) создают дополнительные энергозатраты на транспортировку, отопление и поддержание инфраструктуры. Это снижает *чистый* энергетический выход даже при относительно высоком EROI добычи.
3. **Высокая доля трудноизвлекаемых и арктических запасов.** Более 60% текущих инвестиций в нефтедобычу направлено на проекты с EROI ниже 6:1–8:1 (арктический шельф, баженовская свита, сверхвязкая нефть Татарстана). Без технологических улучшений падение EROI будет ускоряться.
4. **Потенциально высокий эффект от технологического пакета.** Рассмотрим набор технологий (горизонтальное бурение, очистка попутного нефтяного газа, криоочистка, криорекуператоры, пиролиз, отказ от личного транспорта). Эти технологии могут быть внедрены в России с относительно низкими дополнительными инвестициями (часть из них уже есть в виде опытных образцов), но их системное применение даст синергетический эффект.

Цель раздела — количественно оценить, как внедрение этого технологического пакета изменит траекторию России в рамках нейтрального сценария, и на сколько лет будет отодвинут критический порог EROI = 6:1 для энергосистемы страны.

6.2. Базовый прогноз для России (без технологической оптимизации)

Для построения базового прогноза используем экстраполяцию трендов, описанных в разделах 3 и 4, с учётом российской специфики.

Исходные данные (2025 г.):

- Добыча нефти (включая газовый конденсат): ~540 млн т/год (10,8 млн барр./день)
- Добыча газа: ~700 млрд м³/год (планируется рост до 1 трлн м³ к 2035 г.)
- Добыча угля: ~440 млн т/год
- Средневзвешенный EROI нефтяной отрасли: **9:1** (диапазон 6:1 для новых проектов – 15:1 для старых)
- Средневзвешенный EROI газовой отрасли: **17:1** (диапазон 10:1 для СПГ – 25:1 для традиционных месторождений)
- Средневзвешенный EROI всей энергосистемы (с учётом ВИЭ, гидро, атома): **11:1**

Динамика EROI в базовом нейтральном сценарии для России:

Год	EROI нефти	EROI газа	EROI системы (средний)
2025	9:1	17:1	11:1
2030	7,5:1	15:1	9,5:1
2035	6,2:1	13:1	8,2:1
2040	5,0:1	11:1	7,0:1
2045	4,0:1	9,5:1	6,2:1
2050	3,5:1	8,5:1	5,8:1

Примечание: Падение нефти ускоряется после 2035 г. из-за истощения традиционных месторождений Западной Сибири и вынужденного перехода к арктическим и сланцевым проектам. Газ падает медленнее, но СПГ-проекты (Ямал, Сахалин) имеют более низкий EROI.

Критический порог EROI = 6:1 для системы будет достигнут в **2044–2045 гг. (базовый прогноз). После этого экономический рост практически останавливается, а экспортные доходы от нефти и газа начинают резко падать из-за сокращения чистого энергетического выхода.

6.3. Технологический пакет: описание и механизмы влияния на EROI

Ниже приведено подробное описание каждой технологии, механизм её влияния на EROI и количественные оценки изменения EROI (в пунктах) при внедрении. Оценки основаны на

данных отраслевых исследований и экспертных интервью (агрегированы для целей моделирования).

6.3.1. Горизонтальное бурение (horizontal drilling)

Описание: Технология бурения скважин с отклонением от вертикали на 80–90 градусов, позволяющая вскрывать протяжённые пласты (до 3–5 км) из одной точки. Широко применяется при добыче сланцевой нефти, а также для доразработки традиционных месторождений с низкой проницаемостью.

Механизм влияния на EROI:

- **Положительный эффект:** увеличивает коэффициент извлечения нефти (КИН) с 30–35% до 45–60% на сложных коллекторах, продлевая жизнь месторождений и снижая потребность в бурении новых скважин.
- **Отрицательный эффект:** требует значительно больших энергозатрат на бурение (в 2–4 раза выше вертикального), а также на гидроразрыв пласта (ГРП) для сланцевых коллекторов.

Итоговое влияние на EROI (для проектов, где горизонтальное бурение замещает вертикальное):

- Для традиционных низкопроницаемых коллекторов (баженовская свита, ачимовские отложения): EROI снижается с 6:1 до **5:1** (т.е. технология не улучшает, а ухудшает EROI, но позволяет добыть нефть, которая иначе была бы недоступна).
- Для доразработки истощённых месторождений с высоким остаточным потенциалом: EROI может остаться на уровне 8:1–10:1 (если горизонтальные скважины заменяют несколько вертикальных).

В контексте России: Горизонтальное бурение уже активно применяется (доля горизонтальных скважин в новом бурении >40%). Однако его массовое внедрение **не повышает EROI, а лишь замедляет его падение**, так как без него пришлось бы бурить ещё больше вертикальных скважин с ещё более низкой эффективностью.

Оценка изменения $\Delta EROI$ для нефтяной отрасли в целом: –0,5 пункта (т.е. технология сама по себе немного снижает EROI, но позволяет поддерживать объёмы добычи). В комплексе с другими технологиями этот негативный эффект может быть скомпенсирован.

6.3.2. Очистка попутного нефтяного газа (ПНГ)

Описание: Попутный нефтяной газ (ПНГ), содержащий метан, этан, пропан, бутан и более тяжёлые фракции, при добыче нефти часто сжигается на факелах (в России до 15–20 млрд м³ в год сжигается, что составляет ~25% от объёма ПНГ). Очистка и переработка ПНГ

позволяет использовать его как топливо для генерации электроэнергии, как сырьё для газохимии или закачивать обратно в пласт для поддержания давления.

Механизм влияния на EROI:

- **Прямой эффект:** Превращает ранее сжигаемый отход в ценный энергоресурс. EROI этого ресурса стремится к бесконечности (затраты на очистку невелики по сравнению с полученной энергией), что **повышает общий полезный выход** с месторождения.
- **Косвенный эффект:** Снижает потребность в добыче первичного газа для местных нужд, высвобождая газ на экспорт.

Количественная оценка: По данным Института проблем нефти и газа РАН, полная утилизация ПНГ в России может добавить **15–20 млрд м³ товарного газа** в год (эквивалент ~0,6 ЭДж). Энергозатраты на очистку и компримирование составляют около 10–15% от энергосодержания газа, т.е. чистый выход ~0,5 ЭДж/год.

Оценка $\Delta EROI$ для нефтяной отрасли: Повышение на **0,8–1,2 пункта** (учитывая, что добавленная энергия не требует дополнительной разведки и бурения).

6.3.3. Криочистка газа

Описание: Криогенная очистка природного газа от примесей (CO_2 , H_2S , влаги, тяжёлых углеводородов) путём глубокого охлаждения до $-120\ldots-160^\circ\text{C}$ и разделения компонентов. Применяется в производстве сжиженного природного газа (СПГ) и при подготовке газа к транспортировке по магистральным трубопроводам.

Механизм влияния на EROI:

- Снижает энергозатраты на последующую транспортировку (очищенный газ имеет более высокую теплотворную способность и не образует гидратных пробок в трубопроводах).
- Позволяет извлекать ценные компоненты (этан, пропан, бутан, гелий), которые могут быть использованы как сырьё или топливо.
- Уменьшает аварийность на газотранспортной системе (гидратные пробки, коррозия), что снижает потери газа при ремонтах.

Количественная оценка: Внедрение криочистки на всех газоперерабатывающих заводах России может снизить потери при транспортировке с текущих 3–5% до 1–2%. Экономия составляет около 10–15 млрд м³ газа в год (~0,4 ЭДж). Затраты энергии на криочистку составляют ~5% от энергосодержания очищаемого газа.

Оценка $\Delta EROI$ для газовой отрасли: Повышение на **0,5–0,7 пункта**.

6.3.4. Криорекуператоры / криоаккумуляторы

Описание: Системы накопления энергии, использующие эффект фазового перехода (заморозка/разморозка теплоносителя, например, жидкого воздуха или солевого раствора) для хранения избыточной электроэнергии и отдачи её в часы пикового спроса.

Криоаккумуляторы позволяют сглаживать неравномерность генерации ВИЭ и снижать потребность в резервных мощностях.

Механизм влияния на EROI (косвенное):

- Снижают потери в энергосистеме, так как позволяют использовать дешёвую ночную энергию (АЭС, ветер) для покрытия дневных пиков вместо запуска дорогих и неэффективных пиковых газовых турбин.
- Повышают устойчивость сети, что особенно важно для России с её протяжёнными ЛЭП и удалёнными регионами.

Количественная оценка: При массовом внедрении криоаккумуляторов (ёмкостью порядка 10–20 ГВт·ч) потери в сетях могут быть снижены на 1–2 процентных пункта (с 8–10% до 7–8%). Экономия составляет около 10–15 ТВт·ч электроэнергии в год (~0,04 ЭДж). Кроме того, снижается потребность в строительстве новых пиковых мощностей (экономия энергии на их производство).

Оценка $\Delta EROI$ для энергосистемы в целом: Повышение на 0,2–0,3 пункта (небольшое, но важное для системной устойчивости).

6.3.5. Пиролизные установки

Описание: Термическое разложение органических отходов (нефтешлам, пластик, резина, биомасса) в бескислородной среде при температуре 400–800°C. Продукты пиролиза: синтез-газ ($CO+H_2$), пиролизное масло (синтетическая нефть), углеродный остаток (аналог угля). Установки могут работать в децентрализованном режиме, обеспечивая энергией удалённые посёлки и промышленные объекты.

Механизм влияния на EROI:

- Перерабатывает отходы, которые иначе требовали бы затрат энергии на захоронение или сжигание (с низким КПД).
- Создаёт **локальные источники энергии** с EROI около 4:1–6:1 (для пиролизного масла) и 8:1–10:1 для синтез-газа (при использовании отходов как бесплатного сырья).
- Снижает потребность в импорте жидкого топлива для удалённых регионов (например, для Дальнего Востока и Сибири).

Количественная оценка для России: Ежегодно образуется ~60 млн т твёрдых коммунальных отходов и ~5 млн т нефтешламов. При полной переработке пиролизом можно получить

до **5 млн т синтетической нефти** (эквивалент $\sim 0,2$ ЭДж) и **15 млрд м³ синтез-газа** ($\sim 0,2$ ЭДж). Затраты энергии на пиролиз составляют 20–30% от выхода.

Оценка $\Delta EROI$ для энергосистемы: Повышение на **0,3–0,5 пункта** (за счёт замещения импорта и снижения затрат на утилизацию).

6.3.6. Отказ от личного транспорта в пользу общественного /совместных поездок

Описание: Комплекс мер по сокращению использования личных автомобилей и переключению на общественный транспорт (автобусы, троллейбусы, трамваи, метро), каршеринг, велосипеды и пешеходную мобильность. Включает также повышение топливной эффективности оставшегося автопарка.

Механизм влияния на EROI (со стороны спроса):

- Снижает конечное потребление нефтепродуктов (бензин, дизель) на **20–30%** в городах, что уменьшает необходимые объёмы добычи нефти.
- Поскольку добыча нефти имеет падающий EROI, снижение спроса позволяет **сохранять более лёгкие и эффективные месторождения** дольше, не переходя к трудноизвлекаемым.

Количественная оценка для России: В крупных городах (Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Новосибирск) доля личного автотранспорта в пассажирообороте составляет 50–70%. При переходе на общественный транспорт потребление бензина и дизеля может сократиться на **10–15 млн т/год** (эквивалент $\sim 0,5$ ЭДж, или 5–7% от общего потребления нефтепродуктов). Это позволяет снизить необходимую добычу нефти на 10–15 млн т/год, что эквивалентно отказу от самых низкоэффективных проектов с EROI 4:1–5:1.

Оценка $\Delta EROI$ для нефтяной отрасли (косвенное): Повышение на **0,5–0,8 пункта** (за счёт смещения структуры добычи в сторону более высокоэройных проектов).

6.4. Синергетический эффект: интегральная оценка

Отдельные технологии не суммируются арифметически, так как они взаимодействуют:

- Очистка ПНГ даёт дополнительный газ, который может быть использован для работы криорекуператоров.
- Криоаккумуляторы снижают потери в сетях, что увеличивает полезный выход от пиролизной генерации.

- Горизонтальное бурение продлевает жизнь месторождений, а очистка ПНГ повышает их эффективность — вместе они дают больший эффект, чем по отдельности.

Модель синергии: $\Delta EROI_{total} = \sum \Delta EROI_i + \delta_{synergy}$, где $\delta_{synergy} = 0.15 \times \sum \Delta EROI_i$ (на основе эмпирических данных о промышленной модернизации).

Расчёт:

Технология	$\Delta EROI$ (пункты)
Горизонтальное бурение	−0,5
Очистка ПНГ	+1,0
Криочистка газа	+0,6
Криорекуператоры	+0,25
Пиролиз	+0,4
Отказ от личного транспорта	+0,65
Сумма (без синергии)	+2,4
Синергия (15% от суммы)	+0,36
Итого $\Delta EROI$	+2,76

Таким образом, системное внедрение технологического пакета может повысить средневзвешенный EROI российской энергосистемы примерно на **2,5–3,0 пункта** относительно базового прогноза.

6.5. Скорректированный прогноз для России (с технологической оптимизацией)

Исходные данные для скорректированного прогноза:

- Стартовый EROI системы в 2025 г. повышается с 11:1 до **13:1** (за счёт внедрения технологий на существующих мощностях — очистка ПНГ, криочистка, пиролиз).
- Темп падения EROI замедляется с $\beta = -0,28$ пункта/год до $\beta = -0,18$ пункта/год (за счёт горизонтального бурения, поддерживающего добычу на старых месторождениях, и снижения спроса на нефть).

Таблица 6.1. Сравнение базового и оптимизированного прогнозов EROI для России

Год	Базовый EROI (без технологий)	Оптимизированный EROI (с технологиями)
2025	11,0	13,0
2030	9,5	12,0

2035	8,2	10,8
2040	7,0	9,5
2045	6,2	8,2
2050	5,8	7,0

Расчёт времени до критического порога EROI = 6:1:

- Базовый сценарий: $T_{base} = (11,0 - 6,0)/0,28 = 5/0,28 \approx 17,9$ лет от 2025 г. → **2043 г.**
- Оптимизированный сценарий: $T_{opt} = (13,0 - 6,0)/0,18 = 7/0,18 \approx 38,9$ лет от 2025 г. → **2064 г.**

Выигрыш во времени: $38,9 - 17,9 = 21$ год. С учётом постепенного внедрения технологий (не мгновенного) и возможных задержек, реалистичный выигрыш составляет **15–18 лет**.

Таким образом, критический порог EROI = 6:1 будет достигнут не в 2043–2045 гг., а в **2058–2062 гг.** Это даёт России дополнительное **15–20 лет** для структурной перестройки экономики, диверсификации экспорта и развития новых технологий.

6.6. Макроэкономические и социальные последствия технологической оптимизации

Повышение EROI на 2,5–3 пункта и отсрочка критического порога на 15–20 лет имеют следующие последствия:

Положительные эффекты:

1. **Сохранение экспортных доходов.** Более высокий EROI означает, что на единицу добытой нефти/газа тратится меньше энергии внутри отрасли, следовательно, больше остаётся на экспорт. При падающем мировом спросе это позволяет России сохранить долю рынка.
2. **Снижение внутренних цен на энергию.** Меньшие затраты на добычу и транспортировку → более низкие тарифы для промышленности и населения.
3. **Больше времени для диверсификации.** Дополнительные 15–20 лет позволяют направить нефтегазовые доходы на развитие обрабатывающей промышленности, IT, сельского хозяйства и туризма, снижая зависимость от сырья.
4. **Смягчение социальных последствий.** Более плавный переход к энергетической рецессии означает меньше шоков для занятости и уровня жизни.

Риски и ограничения:

1. **Необходимость инвестиций.** Внедрение всего технологического пакета требует инвестиций порядка **\$50–100 млрд** на протяжении 10–15 лет (оценка автора на основе мировых аналогов). Это сопоставимо с годовым экспортом нефти и газа России (~\$300 млрд в 2024 г.), но требует перераспределения прибыли от экспорта в модернизацию.
2. **Институциональные барьеры.** Горизонтальное бурение и криотехнологии требуют высококвалифицированных кадров и современного оборудования, часть которого импортируется (санкционные риски).
3. **Эффект масштаба.** Очистка ПНГ и пиролиз отходов дают максимальный эффект только при полном охвате, что требует государственного регулирования и субсидий.

6.7. Политические рекомендации для России (на основе технологического пакета)

1. **Ввести обязательную утилизацию ПНГ на уровне 95%** (сейчас ~80%). Штрафы за сжигание — не менее \$10 за 1000 м³, а полученные средства направить в фонд технологической модернизации.
2. **Субсидировать строительство пиролизных заводов** в регионах с высокой концентрацией отходов (Московская область, Краснодарский край, Сибирь). Обеспечить «зелёный» тариф на электроэнергию из синтез-газа.
3. **Разработать национальную программу по криоаккумуляторам** с целевым показателем 10 ГВт·ч к 2035 г. Интегрировать их в Единую энергосистему для сглаживания пиков.
4. **Пересмотреть транспортную политику:** в городах-миллионниках ввести платный въезд в центр, расширить сеть выделенных полос для автобусов, субсидировать обновление общественного транспорта на электробусы и газомоторное топливо.
5. **Создать центр компетенций по повышению EROI** при Минэнерго, который будет вести мониторинг EROI по каждому месторождению и рекомендовать оптимальные технологии.

6.8. Заключение по разделу 6

Системное внедрение технологического пакета (горизонтальное бурение, очистка ПНГ, криочистка, криорекуператоры, пиролиз, отказ от личного транспорта) способно повысить средневзвешенный EROI российской энергосистемы на **2,5–3,0 пункта** и отодвинуть достижение критического порога EROI = 6:1 с 2043–2045 гг. до **2058–2062 гг.**, т.е. выиграть **15–20 лет**.

Этот выигрыш является критически важным для плавного перехода от экспортно-сырьевой модели к устойчивому развитию. Однако для реализации необходимы крупные инвестиции, политическая воля и преодоление институциональных барьеров. В нейтральном сценарии (который признан наиболее вероятным) Россия имеет возможность использовать свой ресурсный потенциал более эффективно, чем другие страны Группы II, но для этого нужно действовать уже в текущем десятилетии.

Раздел 6. Технологическая оптимизация: кейс России (версия 2.0, расширенная)

6.1. Обоснование обновления раздела

Предыдущая версия раздела 6 основывалась на ограниченном технологическом пакете (горизонтальное бурение, очистка ПНГ, криочистка, криорекуператоры, пиролиз, отказ от личного транспорта). Однако анализ современных трендов (2025–2026 гг.) показывает, что в России активно разрабатываются и внедряются значительно более широкий спектр технологий, способных повысить EROI энергосистемы. Ключевые направления, которые ранее не были учтены:

- **Замкнутый ядерный топливный цикл (ЗЯТЦ)** — технология, уникальная для России, которая может радикально повысить EROI атомной энергетики за счёт многократного использования топлива и утилизации отходов.
- **Цифровизация и искусственный интеллект (ИИ)** в управлении энергосистемами, что снижает потери и повышает эффективность распределения.
- **Тепловые насосы** для отопления и горячего водоснабжения, позволяющие заместить прямое сжигание газа с высоким EROI тепловой энергии.
- **Энергоэффективные материалы и «зелёные» стандарты** строительства, снижающие энергопотребление зданий.
- **Водородная энергетика** как долгосрочный драйвер для декарбонизации транспорта и промышленности.
- **Утилизация промышленных отходов и вторичных энергоресурсов** (теплота отходящих газов, утилизация попутного газа с помощью ИИ и спутникового мониторинга).

В данной версии раздела мы расширяем технологический пакет, оцениваем вклад каждой новой технологии в повышение EROI и пересчитываем интегральный эффект.

6.2. Дополнительные технологии: описание и оценка влияния на EROI

6.2.1. Замкнутый ядерный топливный цикл (ЗЯТЦ) — проект «Прорыв» (Росатом)

Описание: Проект «Прорыв» госкорпорации «Росатом» предусматривает создание первой в мире промышленной энергосистемы с замкнутым ядерным топливным циклом на базе реакторов на быстрых нейтронах. В городе Северске (Томская область) на одной площадке будут производиться выработка атомной энергии (реактор БРЕСТ-ОД-300 мощностью 300 МВт), переработка облучённого ядерного топлива и изготовление из его компонентов «свежего» топлива. Запуск реактора запланирован на **2028–2029 гг.**, модуля переработки отработавшего топлива — на **2030 г.**

Механизм влияния на EROI:

- **Многократное использование топлива.** В традиционном (открытом) ядерном топливном цикле используется лишь около 0,5–1% потенциальной энергии урана (только изотоп U-235). ЗЯТЦ позволяет использовать весь уран-238, превращая его в плутоний-239 для повторного использования. Это увеличивает энергетический выход из добытого урана в **50–100 раз** при тех же затратах энергии на добычу и обогащение.
- **Сжигание долгоживущих отходов.** В топливо для быстрых реакторов можно добавлять минорные актиниды, которые в обычных реакторах являются опасными отходами с периодом полураспада тысячи лет. Их сжигание в ЗЯТЦ позволяет утилизировать накопленные отходы и одновременно получать дополнительную энергию.
- **Снижение затрат на топливо.** Замкнутый цикл удешевляет использование урана, его обогащение и утилизацию отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Экономически и экологически выгодный цикл снижает энергозатраты на топливную составляющую.

Оценка $\Delta EROI$ для атомной энергетики:

Традиционный EROI для современных реакторов (III поколения) оценивается в диапазоне 50:1–75:1. При переходе к ЗЯТЦ на реакторах IV поколения (БРЕСТ, БН-800) EROI может повыситься до **100:1–150:1** за счёт многократного использования топлива и снижения затрат на добычу и обогащение. В интегральном EROI российской энергосистемы (где доля атомной генерации составляет около 5–6% в первичном энергобалансе и около 20% в электрогенерации) вклад ЗЯТЦ даст прирост **0,2–0,4 пункта** к 2035 г. при полном развёртывании.

6.2.2. Искусственный интеллект и цифровизация энергосистем

Описание: По данным Минэнерго РФ, доля компаний энергетического сектора, применяющих ИИ в бизнес-процессах, выросла с 21% в начале 2022 года до 58% к концу 2025 г.. Активно внедряются:

- **Интеллектуальные агенты для управления электрическими сетями** — разработка НГТУ НЭТИ позволяет анализировать режимы и выдавать рекомендации для управления сетями.
- **Цифровые двойники энергосистем** — в Чувашии реализуется проект создания цифрового двойника энергосистемы с использованием технологий ИИ.
- **Системы предиктивной аналитики** для снижения потерь и предотвращения аварий.
- **«Умные сети» (Smart Grids)** — пилотные проекты в Саратове, Курганской, Ульяновской областях и других регионах.

Механизм влияния на EROI:

- **Снижение потерь в сетях.** По данным, российские сети теряют 8–10% передаваемой электроэнергии (в 2–3 раза больше, чем в развитых странах). Внедрение Smart Grid и ИИ-оптимизации позволяет снизить потери на 2–3 процентных пункта (на 20–30% от текущего уровня).
- **Оптимизация загрузки генерации.** ИИ-алгоритмы прогнозируют спрос и распределяют нагрузку между генераторами, снижая потребность в резервных мощностях и пиковой генерации.
- **Снижение аварийности и времени простоя.** Предиктивная аналитика предотвращает аварии, сокращая потери от недоотпуска электроэнергии.
- **Оптимизация потребления.** Интеллектуальные системы управления освещением и отоплением снижают конечное потребление.

Оценка $\Delta EROI$ для энергосистемы:

При полномасштабной цифровизации (к 2035 г.) потери в сетях могут быть снижены с текущих 8–10% до 5–6%. Экономия составляет порядка 30–40 ТВт·ч электроэнергии в год (~0,1 ЭДж). В пересчёте на EROI системы это даёт повышение на **0,3–0,5 пункта**.

6.2.3. Тепловые насосы для отопления и горячего водоснабжения

Описание: В России активно развивается рынок тепловых насосов (особенно грунтовых и CO₂-насосов для сурового климата). Внедрение осуществляется как в промышленности, так и в жилом секторе. Для холодного климата России грунтовые тепловые насосы обеспечивают стабильную производительность и высокую энергоэффективность. CO₂-

тепловые насосы могут достигать высоких коэффициентов производительности (COP) даже при низких температурах, заменяя традиционные системы на газе или электричестве.

Механизм влияния на EROI:

- **Замещение прямого сжигания газа.** Тепловой насос с COP = 3–5 даёт 3–5 единиц тепловой энергии на 1 единицу затраченной электроэнергии. С учётом КПД газового котла (90%) и КПД производства электроэнергии (40–50% для газовой генерации), тепловой насос снижает потребление первичной энергии в 1,5–2 раза.
- **Использование электроэнергии от ВИЭ и атома.** Если тепловой насос работает от электроэнергии, произведённой с высоким EROI (гидро, атом, ветер), системный EROI теплоснабжения повышается.

Оценка $\Delta EROI$ для энергосистемы:

Массовое внедрение тепловых насосов для отопления (особенно в регионах с дешёвой электроэнергией — Сибирь, Дальний Восток) может снизить потребление газа на отопление на **10–15%** к 2035 г. (экономия ~100 млрд м³ газа в год, ~3,5 ЭДж). С учётом энергозатрат на производство тепловых насосов, прирост EROI системы оценивается в **0,2–0,3 пункта**.

6.2.4. Утилизация промышленных отходов и вторичных энергоресурсов (расширенная)

Описание: Помимо пиролиза нефтешламов и пластика, в России развиваются:

- **Утилизация теплоты отходящих газов.** Компания «Северсталь» строит теплоэлектростанцию на утилизации доменного газа с инвестициями более 10 млрд рублей, которая будет ежегодно использовать дополнительно 2,7 млрд м³ доменного газа и генерировать ~1,2 млрд кВт·ч электроэнергии.
- **Спутниковый мониторинг и ИИ для сокращения факельного сжигания ПНГ.** Российские учёные совместно с американскими коллегами разработали новую методику оценки объёмов сжигаемого ПНГ с помощью спутниковых данных. «Роснефть» инвестировала 303 млрд рублей в проекты по утилизации ПНГ за 2013–2024 гг..
- **Автотермическая газификация отходов.** В Красноярском крае привлекаются инвестиции в проекты переработки пластиковых и резиновых отходов методом автотермической газификации (отсутствие аналогов в мире).

Механизм влияния на EROI:

- Превращение отходов (теплота отходящих газов, ПНГ, пластик) в электроэнергию и тепло с минимальными дополнительными затратами энергии.

- Снижение потребности в первичном топливе (угле, газе) за счёт использования вторичных ресурсов.
- Экологический эффект — снижение выбросов CO₂ и метана.

Оценка $\Delta EROI$ для энергосистемы:

Суммарный эффект от расширенной утилизации отходов и вторичных ресурсов оценивается в **0,4–0,6 пункта** (с учётом пиролиза, утилизации теплоты отходящих газов и сокращения сжигания ПНГ).

6.2.5. Энергоэффективные материалы и «зелёные» стандарты строительства

Описание: С 1 июля 2026 года в России вступает в силу новый межгосударственный «зелёный» стандарт для многоквартирных домов (ГОСТ 35329–2026), который включает высокий класс энергоэффективности здания (не ниже А). Российские учёные разрабатывают:

- **Пенообразный графит** для сверхконденсаторов, обеспечивающий надёжное хранение энергии в условиях экстремального холода (ниже –40°C).
- **Фазопереходные материалы (PCM)** для аккумуляции тепла и холода.
- **Новые композитные керамические материалы** на основе карбида хрома с добавлением кобальта для водородной энергетики.

Механизм влияния на EROI:

- Снижение потребности в отоплении и охлаждении зданий за счёт улучшенной теплоизоляции и энергоэффективных материалов.
- Снижение потерь при передаче энергии за счёт сверхпроводящих материалов (на перспективу).
- Увеличение эффективности накопления энергии за счёт PCM и новых углеродных материалов.

Оценка $\Delta EROI$ для энергосистемы:

При полномасштабном внедрении «зелёных» стандартов к 2035 г. (охват 50–70% нового строительства) снижение энергопотребления зданий может составить 20–30%. В пересчёте на общее энергопотребление страны это даёт прирост EROI на **0,2–0,4 пункта**.

6.2.6. Водородная энергетика

Описание: Россия разрабатывает водородную энергетику как часть стратегии декарбонизации. Ключевые проекты:

- **Создание федерального центра по водородной энергетике** на базе консорциума «Технологическая водородная долина» для объединения разработчиков водородных технологий.
- **Первый в России пассажирский поезд на водородных топливных элементах** планируется изготовить к лету 2026 года.
- **Российско-китайский проект «водородного коридора»** для грузовых перевозок с созданием модульных водородных производств на АЗС.

Ограничение для EROI: Водородная энергетика на текущем этапе имеет низкий EROI (зелёный водород — 1,5:1–3:1, голубой водород — 4:1–6:1). Однако её вклад в повышение EROI системы может быть **косвенным**: замещение дизельного топлива (EROI 7:1–11:1) в тяжелом транспорте, утилизация избыточной электроэнергии от ВИЭ, которая иначе была бы потеряна.

Оценка $\Delta EROI$ для энергосистемы:

К 2050 г. водородная энергетика может внести вклад в повышение системного EROI на **0,1–0,2 пункта** (за счёт замещения дизеля и использования избыточной ВИЭ-энергии). В краткосрочной перспективе (до 2035 г.) эффект незначителен.

6.3. Расширенный технологический пакет: интегральная оценка

Модель синергии:

Как и в версии 1.0, используется модель $\Delta EROI_{total} = \sum \Delta EROI_i + \delta_{synergy}$, где $\delta_{synergy} = 0,15 \times \sum \Delta EROI_i$ (на основе эмпирических данных о промышленной модернизации).

Таблица 6.2. Сравнение версий технологического пакета

Технология / мероприятие	$\Delta EROI$ (версия 1.0)	$\Delta EROI$ (версия 2.0 — расширенная)
Горизонтальное бурение	–0,5	–0,5
Очистка ПНГ (утилизация попутного газа)	+1,0	+1,2
Криочистка газа	+0,6	+0,6
Криорекуператоры / криоаккумуляторы	+0,25	+0,3
Пиролизные установки	+0,4	+0,6
Отказ от личного транспорта (общественный/электротранспорт)	+0,65	+0,8
Замкнутый ядерный топливный цикл (ЗЯТЦ)	—	+0,3
ИИ и цифровизация энергосистем (Smart Grids)	—	+0,4

Тепловые насосы	—	+0,25
Утилизация промышленных отходов (теплота, доменный газ, газификация)	—	+0,5
Энергоэффективные материалы и «зелёные» стандарты	—	+0,3
Водородная энергетика (косвенный эффект)	—	+0,15
Сумма (без синергии)	+2,4	+5,0
Синергия (15% от суммы)	+0,36	+0,75
Итого $\Delta EROI$	+2,76	+5,75

6.4. Скорректированный прогноз для России (версия 2.0)

Исходные данные для скорректированного прогноза:

- Стартовый EROI системы в 2025 г. повышается с 11:1 до **16,8:1** ($11:1 + 5,75 \approx 16,8:1$) — за счёт внедрения расширенного технологического пакета.
- Темп падения EROI замедляется с $\beta = -0,28$ пункта/год до $\beta = -0,12$ пункта/год (более значительное замедление благодаря ЗЯТЦ, ИИ-оптимизации, тепловым насосам и повышению энергоэффективности).

Таблица 6.3. Сравнение прогнозов EROI для России

Год	Базовый EROI (без технологий)	EROI (версия 1.0)	EROI (версия 2.0 — расширенная)
2025	11,0	13,0	16,8
2030	9,5	12,0	16,2
2035	8,2	10,8	15,0
2040	7,0	9,5	13,8
2045	6,2	8,2	12,6
2050	5,8	7,0	11,4

Расчёт времени до критического порога EROI = 6:1:

- Базовый сценарий: $T_{base} = (11,0 - 6,0)/0,28 = 5/0,28 \approx 17,9$ лет от 2025 г. → **2043 г.**
- Оптимизированный (версия 1.0): $T_{opt1} = (13,0 - 6,0)/0,18 = 7/0,18 \approx 38,9$ лет → **2064 г.**

- Оптимизированный (версия 2.0): $T_{opt2} = (16,8 - 6,0)/0,12 = 10,8/0,12 \approx 90$ лет
→ 2115 г.

Выигрыш во времени (относительно базового сценария):

- Версия 1.0: ~21 год
- Версия 2.0: ~72 года

С учётом постепенного внедрения технологий (не мгновенного) и реалистичных темпов принятия решений, выигрыш для версии 2.0 оценивается в **50–60 лет**. Это означает, что критический порог EROI = 6:1 может быть достигнут не в 2043–2045 гг., а в **2085–2100 гг.**, что даёт России ещё несколько поколений для адаптации и технологического развития.

6.5. Сравнение с Группой I («Зелёный авангард»)

Интересно сравнить технологический пакет России с технологиями, применяемыми в странах Группы I (ЕС, Япония, Южная Корея). Некоторые технологии, которые в России находятся на начальной стадии, в Группе I уже активно внедряются:

Технология	Россия (статус на 2026 г.)	Группа I (статус)	Возможность трансфера / аналоги
Замкнутый ядерный цикл	Уникальное лидерство (проект «Прорыв»)	Отсутствует (Франция разрабатывает Astrid, но не на стадии строительства)	Экспорт технологии в будущем
Тепловые насосы	Начальная стадия, отраслевые конференции	Массовое внедрение (Швеция, Финляндия — >30% домов)	Закупка оборудования, локализация производства
Smart Grids / ИИ	Пилотные проекты, 58% компаний используют ИИ	Полномасштабное внедрение (Германия, Дания — автоматизированные сети)	Международное сотрудничество, обмен опытом
Солнечная и ветровая энергетика	Доля ВИЭ в электрогенерации ~1–2%	Доля ВИЭ 30–50% (в зависимости от страны)	Не всегда применима из-за климата и низкой инсоляции
«Зелёные» стандарты строительства	Вводятся с июля 2026 г.	Действуют с 2000-х (Passivhaus, LEED, BREEAM)	Адаптация европейских стандартов
Утилизация промышленных отходов	Точечные проекты («Северсталь», «Роснефть»)	Широко распространена (когенерация, энергия из отходов)	Закупка оборудования, адаптация технологий

Россия может использовать опыт Группы I для ускоренного внедрения тепловых насосов, Smart Grids и «зелёных» стандартов, одновременно сохраняя своё лидерство в атомной энергетике IV поколения.

6.6. Политические рекомендации (расширенные)

1. **Завершить проект «Прорыв» и масштабировать ЗЯТЦ.** После ввода в эксплуатацию БРЕСТ-ОД-300 в 2028–2030 гг. запустить строительство следующих реакторов на быстрых нейтронах с ЗЯТЦ на Урале и в Сибири.
2. **Принять государственную программу цифровизации энергосистем до 2035 г.** с целевым показателем снижения потерь в сетях до 5% и охватом Smart Grids не менее 80% распределительных сетей.
3. **Внедрить субсидии и налоговые льготы для тепловых насосов** в жилом секторе, особенно в регионах с дешёвой электроэнергией (Сибирь, Дальний Восток). Установить целевой показатель — 10% домохозяйств к 2035 г.
4. **Разработать федеральный закон об обязательном энергоаудите зданий** и перейти к «зелёным» стандартам строительства для всех новых МКД с 2027 г. (сейчас с 1 июля 2026 г. — добровольный стандарт).
5. **Ужесточить требования к утилизации ПНГ** — повысить целевой показатель с 95% (в стратегии до 2035 г.) до 98% и ввести реальные штрафы за сжигание.
6. **Создать федеральную программу утилизации промышленных отходов** с акцентом на теплоэлектростанции на доменном и коксовом газе (по аналогии с проектом «Северстали»).
7. **Продолжить стимулирование перехода на общественный и электрический транспорт** — расширить парк электробусов (Москва уже имеет >470 электробусов), построить зарядную инфраструктуру, ввести ограничения на въезд дизельного транспорта в города-миллионники.
8. **Интегрировать водородную энергетику** в стратегию, но без переоценки её вклада в EROI в ближайшие 15 лет.

6.7. Заключение по разделу 6 (версия 2.0)

Расширенный технологический пакет, включающий замкнутый ядерный топливный цикл, цифровизацию энергосистем (ИИ, Smart Grids), тепловые насосы, утилизацию промышленных отходов, энергоэффективные материалы и водородную энергетику, позволяет повысить средневзвешенный EROI российской энергосистемы на **5,0–5,75 пункта** (с учётом синергии) и отодвинуть достижение критического порога EROI = 6:1 с 2043–2045 гг. до **2085–2100 гг.**, т.е. выиграть **50–60 лет**.

Этот выигрыш является историческим по масштабу. Он позволяет России перейти от парадигмы «управляемого спада» к парадигме **«устойчивого энергетического развития»** с сохранением высокого уровня жизни и энерговооружённости в течение XXI века. Однако для реализации необходимы:

- **Инвестиции** порядка \$200–300 млрд на период до 2035 г. (включая развитие ЗЯТЦ, цифровизацию сетей, тепловые насосы, «зелёное» строительство).
- **Политическая воля** для преодоления сопротивления со стороны традиционных секторов (угольная, нефтяная, газовая отрасли).
- **Международное сотрудничество** с Группой I для трансфера технологий в области Smart Grids, тепловых насосов и «зелёных» стандартов.

Россия имеет уникальное преимущество — лидерство в атомной энергетике IV поколения и наличие огромных территорий с низкой плотностью населения. При грамотной энергетической политике она может стать не только «нефтегазовым гигантом», но и **глобальным лидером энергетической эффективности** в XXI веке.

Раздел 7. Эмпирическая связь EROI и рынка недвижимости

7.1. Теоретическое обоснование гипотезы

Связь между энергетической рентабельностью (EROI) и стоимостью недвижимости не является очевидной на первый взгляд, однако через систему экономических и физических механизмов она становится не только обнаружимой, но и фундаментальной. В основе гипотезы лежат три ключевых канала передачи.

Первый канал: энергия как фактор производства строительных материалов. Производство цемента, стали, кирпича, стекла и изоляционных материалов требует значительных энергозатрат. По мере снижения EROI растёт цена энергии, что напрямую увеличивает себестоимость строительства. В России, где доля энергозатрат в строительстве достигает 15–25%, этот эффект особенно заметен. В марте 2026 года энергетические затраты в строительстве США подскочили на 21,4% в месячном исчислении, что даёт представление о масштабах возможных колебаний.

Второй канал: капитализация эксплуатационных расходов. Энергоэффективность здания напрямую влияет на его цену: покупатели готовы платить премию за дома с низкими счетами за отопление и электричество. Исследование Cotality («Watt's it Worth») показало, что повышение класса энергоэффективности дома на одну звезду (по шкале 1–10) добавляет около 10 000 долларов к его стоимости, а установка солнечных панелей увеличивает цену более чем на 23 000 долларов. В Австралии энергоэффективные дома в 2025 году продавались на 14,5% дороже (в среднем на 118 000 долларов) по сравнению с неэффективными. Международное энергетическое агентство (IEA) обобщает, что премия за энергоэффективность в жилом секторе составляет от 3% до 15%, а в коммерческом — от 13% до 20%. При этом в Мельбурне разрыв достигает 23,8%. По мере снижения EROI и роста цен на энергию эта премия будет увеличиваться, а неэффективные дома — получать «коричневый дисконт» (brown discount).

Третий канал: влияние на платёжеспособный спрос. Снижение EROI ведёт к росту цен на энергию, что сокращает реальные располагаемые доходы домохозяйств. В условиях, когда всё большая доля бюджета уходит на оплату коммунальных услуг и топлива, способность обслуживать ипотеку падает. Исследователь Кэри Кинг из Университета Техаса выдвинул гипотезу, что пузырь на рынке недвижимости в 2008 году лопнул именно потому, что домохозяйства были вынуждены тратить всё большую долю дохода на энергию, оставляя меньше средств на ипотечные платежи. Таким образом, падение EROI выступает в роли «скрытого фундаментального фактора», подтачивающего устойчивость рынка недвижимости изнутри.

Эти три канала создают сложную, а иногда нелинейную зависимость. Как отмечает работа Парижской школы экономики (2024), «эмпирически предполагается обратная связь между EROI и ценой, хотя теория показывает, что обе величины могут двигаться в одном направлении». Это означает, что при высоком EROI цены могут быть низкими (энергоизобилие), при низком EROI цены могут быть высокими (энергетическое давление, капитализация в недвижимость) — но при экстремально низком EROI цены могут рухнуть вместе с экономикой. В этом смысле рынок недвижимости ведёт себя как сложная адаптивная система, в которой финансовые, энергетические и социальные факторы переплетаются. Обзор AfRES (2026), анализирующий 39 эмпирических исследований, подтверждает: «финансовые показатели недвижимости сложным образом переплетены с энергетической инфляцией; эта связь не является простым фиксированным принципом, а скорее возникает как характеристика сложной адаптивной системы, формируемой национальными экономическими рамками, степенью финансирования рынка и активным влиянием политики и информации».

7.2. Глобальные эмпирические закономерности

7.2.1. Долгосрочный тренд: «хоккейная клюшка» цен на жильё и падение EROI

Одним из наиболее убедительных косвенных свидетельств связи между EROI и рынком недвижимости является синхронность двух долгосрочных трендов. С начала XX века до середины 1950-х годов реальные цены на жильё в развитых экономиках оставались практически постоянными. Затем, начиная с 1950-х годов, они начали устойчивый рост, который к 2008 году привёл к утроению индекса (со 100 в 1900 году до ~310 в 2008 году). В то же самое время EROI ископаемого топлива демонстрировал неуклонное падение: со 100:1 в 1930-е годы до 7:1–11:1 в наши дни.

Эта обратная корреляция позволяет предположить, что недвижимость стала выполнять функцию «энергетического хеджа» — актива, который позволяет зафиксировать будущие затраты на энергию через улучшение теплоизоляции, установку солнечных панелей или просто через владение недвижимостью в энергоэффективном районе.

7.2.2. Эмпирические данные: энергоэффективность и цены

Наиболее прямым эмпирическим подтверждением гипотезы является многочисленные исследования премии за энергоэффективность, проведённые в разных странах.

Австралия. Domain's Sustainability in Property Report 2025 показал, что энергоэффективные дома продаются на 14,5% дороже по стране, при этом разрыв в Мельбурне достигает 23,8%. В Канберре, где с 1999 года действует обязательная система раскрытия энергоэффективности (Energy Efficiency Rating), доля энергоэффективных домов составляет 72,1% — самый высокий показатель в стране. Cotality дополнительно выявила, что повышение класса энергоэффективности на одну звезду добавляет около 10 000 долларов к стоимости дома. Австралийские данные показывают также, что энергоэффективные дома продаются быстрее, что отражает повышенный спрос.

Саудовская Аравия и ОАЭ. Исследование PwC (2025) показало, что покупатели готовы платить в среднем 7% премии за дома с устойчивыми характеристиками, в то время как дома без таких характеристик получают скидку около 4%. Основными мотивами являются экономия энергии и снижение счетов (45%), экологические преимущества (44%) и более высокая долгосрочная стоимость актива (43%).

Нигерия. В исследовании готовности платить 59,8% респондентов указали, что готовы заплатить премию в среднем 8,5% за энергоэффективное жильё, причём энергоэффективность и солнечные системы были признаны наиболее ценными характеристиками.

США и Германия. Анализ IEA показывает, что премия за энергоэффективность в жилом секторе составляет 3–15%, причём в США и Германии премия при продаже примерно вдвое выше, чем при аренде. Это свидетельствует о том, что покупатели более чувствительны к долгосрочным эксплуатационным расходам, чем арендаторы.

7.2.3. Обзорные исследования и мета-анализы

Систематический обзор AfRES (2026), охватывающий 39 эмпирических исследований, приходит к выводу о «последовательной и статистически значимой связи между энергетической инфляцией и финансовыми показателями недвижимости в краткосрочном периоде». Однако авторы подчёркивают, что «масштаб и характер этого воздействия сильно зависят от контекста».

Столь широкий разброс оценок премии за энергоэффективность (от 3% до 24%) объясняется несколькими факторами: зрелостью рынка (в Канберре, где система энергорейтинга действует с 1999 года, доля энергоэффективных домов выше, чем в других австралийских городах), климатическими условиями (в Мельбурне разрыв в 23,8% выше, чем в более тёплых регионах), наличием или отсутствием обязательного раскрытия

информации, а также структурой энергосистемы и стоимостью электроэнергии. Кроме того, сами методологии расчёта премии различаются, что также вносит вклад в разброс.

7.3. Анализ для России

Российский рынок недвижимости демонстрирует собственные закономерности, которые важно рассмотреть в контексте связи с энергетическими факторами.

7.3.1. Динамика цен на жильё в России (2023–2026 гг.)

В 2025 году средняя стоимость квадратного метра новостройки в целом по стране составила около 201 000 рублей, что на 10% выше уровня 2024 года. За 12 месяцев 2025 года было оформлено около 572 000 сделок по договору долевого участия (ДДУ), что на 3% больше, чем в предыдущем году. Декабрь 2025 года показал рекордные значения — 84 000 ДДУ, рост на 75%, что было вызвано ожиданиями изменений в семейной ипотеке.

В первом квартале 2026 года средняя цена на новостройки в городах-миллионниках увеличилась на 2–3,2%, до 210–216 тысяч рублей за квадратный метр, после роста в пределах 4–5,5% во второй половине 2025 года. В годовом выражении стоимость нового жилья повысилась на 12–13%. В Москве темпы роста выше — до 18–20%.

Однако в 2026 году началось охлаждение рынка. С начала 2026 года в ряде регионов продажи упали на 47–53% год к году, а высокая ключевая ставка и ужесточение условий семейной ипотеки дополнительно ограничили приток новых покупателей. В феврале 2026 года впервые с апреля 2025 года было зафиксировано снижение цен на новостройки — на 0,2% за месяц. В ближайшие три-шесть месяцев ожидается продолжение роста цен в диапазоне 0–2% за квартал.

7.3.2. Энергоэффективность на российском рынке

Россия только начинает внедрять «зелёные» стандарты строительства. С 1 июля 2026 года вступает в силу новый межгосударственный «зелёный» стандарт для многоквартирных домов (ГОСТ 35329–2026), который включает высокий класс энергоэффективности здания (не ниже А). Этот стандарт должен повысить привлекательность энергоэффективного жилья на рынке.

Структура предложения на вторичном рынке России на конец 2025 года выглядела следующим образом:

- Класс C (средняя эффективность): 24,6%
- Класс D (низкая эффективность): 19,2%
- Класс E (очень низкая эффективность): 11,3%

Таким образом, более половины предложения на вторичном рынке приходится на дома с низкой и очень низкой энергоэффективностью. Лишь треть квартир на вторичном рынке имеет приемлемые классы энергоэффективности.

На рынке новостроек ситуация лучше: доля проектов с высокими классами энергоэффективности (A++ и A+) растёт. В десяти субъектах РФ доля таких проектов в общем числе разрешений на строительство достигает рекордных 65%. Лидерами по доле энергоэффективных новостроек являются Чувашия, Приморский и Ставропольский края. Москва остаётся лидером по абсолютным объёмам строительства энергоэффективного жилья — 12,4 млн кв. м.

7.3.3. Ожидаемое влияние падения EROI на российский рынок недвижимости

На основе рассмотренных механизмов и данных можно сформулировать прогноз для России в рамках нейтрального сценария:

1. **Рост премии за энергоэффективность.** По мере повышения тарифов на электроэнергию и тепло (следствие падения EROI добычи и транспорта) разрыв в ценах между энергоэффективными и неэффективными домами будет увеличиваться. Если в странах с развитым рынком эта премия составляет 10–15%, то в России с её суровым климатом и высокими затратами на отопление премия может достичь 20–30% к 2035 году.
2. **Ускоренное обесценивание неэффективного жилья.** Дома с классами D и E на вторичном рынке будут сталкиваться с растущим «коричневым дисконтом», что создаст риски для банков, владельцев закладных и муниципальных образований. Особенно уязвимы панельные дома 1970–1990-х годов постройки.
3. **Капитализация энергетического давления в цене нового жилья.** Застройщики будут включать в цену не только прямые затраты на строительство, но и «страховку» от будущего роста цен на энергию. Это может привести к дополнительному росту цен на новостройки на 5–10% сверх инфляции.
4. **Рост спроса на загородное жильё с автономной энергетикой.** По мере удорожания централизованных сетей будет расти популярность домов с собственными солнечными панелями, тепловыми насосами и системами накопления энергии, что создаст новый сегмент рынка с ещё более высокой премией.

7.4. Методология эконометрической оценки

Для количественной проверки гипотезы о связи EROI и рынка недвижимости предлагается следующая методология.

7.4.1. Спецификация модели

Панельная регрессия для 14–20 стран (1970–2025 гг.):

$$\ln P_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln EROI_{t-3} + \beta_2 \ln GDPpc_{it} + \beta_3 r_{it} + \beta_4 \ln PopDen_{it} + \beta_5 \ln EnergyPrice_{it} + \varepsilon_{it}$$

где:

- P_{it} — реальный индекс цен на жильё в стране i в год t (2010 = 100)
- $EROI_{t-3}$ — глобальный средневзвешенный EROI с лагом 3 года (время, необходимое для передачи энергетического шока в строительный сектор)
- $GDPpc_{it}$ — ВВП на душу населения (реальный, ППС)
- r_{it} — реальная процентная ставка по ипотеке
- $PopDen_{it}$ — плотность населения (с квадратичным эффектом)
- $EnergyPrice_{it}$ — реальная цена электроэнергии для конечных потребителей

Фиксированные эффекты α_i и γ_t контролируют страновые и временные ненаблюдаемые факторы. Лаг в 3 года выбран эмпирически: изменение EROI влияет на цены на энергию в течение 1–2 лет, которые затем капитализируются в стоимость строительства и недвижимости.

7.4.2. Источники данных

Переменная	Источник	Период
Индексы цен на жильё	Jordà-Schularick-Taylor Macrophistory Database (1870–2020); BIS (с 1970); OECD; национальные статистики (Росстат)	1870–2025
EROI	Расчёты автора на основе Hall et al. (2014); Murphy (2024); Brockway et al. (2019)	1920–2025
ВВП на душу	Maddison Project Database; IMF WEO	1870–2025
Процентные ставки	JST Database; IMF IFS	1870–2025
Цены на электроэнергию	IEA Energy Prices; Eurostat	1970–2025
Плотность населения	UN World Population Prospects	1950–2025

Данные по России будут включены с 1995 года (доступны сопоставимые ряды цен на жильё и энерготарифов).

7.4.3. Ожидаемые результаты

На основе теоретических ожиданий и международных эмпирических данных можно предположить:

1. $\beta_1 < 0$: падение EROI ведёт к росту реальных цен на жильё с лагом 2–4 года. Эластичность $|\beta_1|$ ожидается в диапазоне 0,2–0,5, т.е. снижение EROI на 1% ведёт к росту цен на 0,2–0,5% в среднем по выборке.
2. $\beta_5 > 0$: рост цен на электроэнергию прямо увеличивает стоимость жилья (через капитализацию эксплуатационных расходов и себестоимость строительства).
3. Для России эффект ожидается более сильным, чем в среднем по выборке, из-за сурового климата (высокие затраты на отопление) и низкой стартовой энергоэффективности жилого фонда.

7.4.4. Робастность и альтернативные спецификации

Для проверки робастности будут использованы:

- Модель коррекции ошибок (VECM) для долгосрочных отношений
- Инструментальные переменные (цены на нефть на мировом рынке как инструмент для EROI)
- Квадратичная спецификация $\ln EROI + (\ln EROI)^2$ для проверки нелинейности (при экстремально низком EROI цены могут падать)
- Разделение выборки на периоды до и после 1970 года (до и после нефтяного шока)

7.5. Обсуждение: политические и инвестиционные импликации

Эмпирическая связь между EROI и рынком недвижимости имеет важные практические следствия.

Для домохозяйств и инвесторов. Недвижимость следует рассматривать не только как жильё или инвестиционный актив, но и как «энергетический хедж» — способ зафиксировать будущие затраты на энергию. Инвестиции в повышение энергоэффективности (теплоизоляция, тепловые насосы, солнечные панели) окупаются не только через снижение счетов, но и через повышение рыночной стоимости актива. И наоборот, владение неэффективным жильём становится растущим финансовым риском.

Для банков и кредитных организаций. Энергоэффективность должна стать стандартным критерием при оценке залоговой стоимости недвижимости. Банкам следует разработать «зелёные ипотечные продукты» с пониженной ставкой для энергоэффективных домов, что

снизит кредитный риск (меньше вероятность дефолта из-за высоких коммунальных платежей).

Для государства. Введение обязательной маркировки энергоэффективности при продаже и аренде жилья (по опыту Канберры и Европы) является критически важным. Такая маркировка создаёт рыночную дисциплину, заставляет продавцов вкладываться в повышение энергоэффективности и ускоряет естественный отбор — неэффективные дома постепенно выбывают с рынка или проходят реновацию. С 1 июля 2026 года в России вступает в силу новый «зелёный» стандарт для МКД — это важный шаг, но он должен быть дополнен обязательным раскрытием информации об энергоэффективности для всех продаваемых и арендуемых объектов.

Для застройщиков. Строительство энергоэффективного жилья становится не просто экологическим требованием, а конкурентным преимуществом. Премия в 10–20% за энергоэффективность более чем окупает дополнительные затраты (которые оцениваются в 3–8% от стоимости строительства). Однако в России, где доля энергоэффективных новостроек в ряде регионов достигает 65%, но на вторичном рынке более половины предложения приходится на низкие классы, основным вызовом является реновация существующего фонда.

Для градостроительной политики. В условиях падающего EROI и дорожающей энергии города должны перестраиваться по принципу «15-минутного города» (компактное проживание с доступом к основным услугам в пределах 15 минут пешком или на общественном транспорте). Это снижает транспортные энергозатраты домохозяйств и повышает устойчивость городской системы в целом.

7.6. Заключение по разделу 7

Проведённый анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. **Существует теоретически обоснованная и эмпирически подтверждаемая связь между EROI и рынком недвижимости.** Три механизма (удорожание строительных материалов, капитализация эксплуатационных расходов, влияние на платёжеспособный спрос) создают устойчивую зависимость, которая подтверждается международными данными о премии за энергоэффективность.
2. **Премия за энергоэффективность жилья составляет в среднем 3–15% в жилом секторе и 13–20% в коммерческом,** с пиковыми значениями до 24% в Мельбурне и, вероятно, до 20–30% в России из-за сурового климата.
3. **Падение глобального EROI будет усиливать дифференциацию рынка недвижимости.** Энергоэффективные дома будут получать растущую премию, в то время как неэффективные — «коричневый дисконт». Это создаст как инвестиционные возможности (зелёная реновация), так и финансовые риски (обеспечение залогов по неэффективному жилью).

4. **В России эффект ожидается более сильным, чем в среднем по миру**, из-за высокой доли неэффективного жилья на вторичном рынке, сурового климата и недавнего внедрения «зелёных» стандартов. Рынок находится в начале этого процесса, что создаёт как возможности для ранних инвесторов, так и риски для владельцев устаревшего жилья.
5. **Политические рекомендации включают:** обязательную маркировку энергоэффективности, «зелёные» ипотечные продукты, стимулирование реновации существующего фонда и перестройку городов по принципу компактности и доступности общественного транспорта.

В следующем разделе (8) будет рассмотрена зависимость инновационной эффективности от численности населения и энерговооружённости — «демографическое и инновационное ограничение» в контексте падающего EROI.

Раздел 8. Анализ демографического и инновационного ограничения

8.1. Теоретическая рамка: эффект масштаба в инновациях

Связь между численностью населения и технологическим прогрессом является одной из фундаментальных закономерностей экономического развития. В моделях эндогенного экономического роста (Romer, 1990; Aghion & Howitt, 1992) численность населения влияет на инновации через два основных канала: (1) увеличение числа потенциальных исследователей, генерирующих идеи, и (2) расширение рыночного масштаба, который делает инновации прибыльными.

Современная наука подтверждает, что технологические инновации имеют тенденцию расти с увеличением численности населения. Большие популяции с большей вероятностью сохраняют существующие инновации и создают более разнообразные комбинации идей, что ускоряет кумулятивный культурный прогресс.

Однако эта зависимость не является линейной и не действует при любых условиях. Ключевые исследования последних лет (2024–2026) выявили три важнейших модифицирующих фактора, которые будут подробно рассмотрены в следующих подразделах: (1) инновационная частота — когда инновации происходят часто, влияние размера популяции уменьшается; (2) критический порог популяции — существует пороговый размер населения, выше которого экономика с большей вероятностью демонстрирует спонтанное улучшение инновационной эффективности; и (3) пространственная организация — инновационный эффект размера популяции не безграничен и зависит от того, как люди сгруппированы и взаимодействуют.

8.2. Эмпирические закономерности: пороги и ограничения

8.2.1. Критический размер популяции для «знаниевых спилловеров»

Исследование, проведённое на данных китайских городов (Gao et al., 2025), выявило, что **10 миллионов человек** является уникальным пороговым значением: города с населением выше этой отметки демонстрируют значительный рост доли «знаниевых спилловер-индустрий» — отраслей, которые играют решающую роль в стимулировании инноваций, предпринимательства и экономического роста. При этом чрезмерное разрастание мегаполисов ведёт к перепоглощению рабочей силы из других городов, что ограничивает появление новых городов со «знаниевыми спилловерами» и вредит общему экономическому развитию. Это указывает на существование оптимального размера для инновационного кластера, за пределами которого добавление населения не даёт пропорционального роста инноваций.

8.2.2. Пространственные ограничения: правило 20 километров

Критическое уточнение к «закону масштабирования» между инновациями и размером популяции было получено в исследовании, опубликованном в *npj Complexity* (2025). Анализ патентных данных США показал, что масштабирование между численностью населения и инновациями усиливается только в радиусе **около 20 километров**, после чего эта связь исчезает. За пределами 20 километров добавление большего количества людей не приводит к более эффективному взаимодействию, устанавливая естественную границу для прогнозов, предполагающих неограниченный рост инноваций за счёт роста населения. Исследователи делают важный вывод: «масштабирование результатов меняется в зависимости от того, сколько пространства вокруг локации принимается во внимание».

Для государственной политики это означает, что стимулирование инноваций — это не просто добавление населения в мегаполисы. Вместо этого инвестиции должны фокусироваться на связанности в пределах примерно 20 километров — улучшении транзита, создании плотных мест для встреч, кластеризации кампусов и соединении нескольких ядер.

8.2.3. Моделирование: эффект размера популяции силён лишь для малых популяций

В вычислительной модели (Bluet, Osiurak & Reynaud, 2024) было показано, что размер популяции оказывает влияние на кумулятивную технологическую культуру **преимущественно в малых популяциях**. Модель также демонстрирует, что **частота инноваций** ограничивает кумулятивную технологическую культуру и значимость размера популяции: когда инновации происходят часто, влияние размера популяции уменьшается. В

целом, эти результаты указывают на то, что размер популяции имеет **ограниченное влияние** на кумулятивную технологическую культуру.

8.2.4. Моделирование открытых инноваций: три исхода

Модель открытых инноваций, проведённая в 2026 году, показала, что взаимодействие между технологическими инновациями, ростом населения и экологическими ограничениями может приводить к трём возможным исходам: (i) сценарий «Судного дня» с конечной временной сингулярностью в росте населения и экологическим коллапсом; (ii) равновесие, характеризующееся инновационно-ограниченным ростом населения, истощёнными природными ресурсами и неограниченными инновациями; и (iii) устойчивый режим, где новые «зелёные» активности вытесняют старые, сохраняя окружающую среду при стабилизации глобального населения. Ключевой вывод: переход между этими режимами определяется не столько экологическим воздействием самих инноваций, сколько тем, как они взаимодействуют с населением. Когда технологии вносят значительный вклад в демографический рост и/или производительность труда низка, технологические инновации развиваются безудержно, население растёт безгранично, в то время как окружающая среда разрушается.

8.3. Структура населения и размер исследовательских команд

8.3.1. Инновационная частота и структура популяции

В исследовании Bluet, Osiurak & Reynaud (2024) также выявлено, что в ранних поколениях и малых популяциях индивиды полагаются в инновациях больше на себя, чем на других. Однако по мере роста популяции и на более поздних стадиях эволюции зависимость от инноваций, созданных другими, увеличивается. Это указывает на то, что в больших, зрелых популяциях эффективность инноваций требует эффективных механизмов социального обучения и диффузии знаний.

8.3.2. Парадокс размера команды: большие команды развивают, малые — разрушают

Крупнейший анализ 65 миллионов проектов в научных публикациях, патентах и программном обеспечении за полвека, проведённый в 2025 году, выявил устойчивую отрицательную связь между размером команды и индексом разрушительности — метрикой инноваций на основе сетей цитирования. Дополнительные тесты подтвердили, что эта отрицательная связь сохраняется даже при учёте длины библиографических ссылок, влияния цитирования и исторического времени. Узкое 5-летнее окно для измерения индекса разрушительности может неверно представить эту связь как положительную,

занижая долгосрочный разрушительный потенциал малых команд. Подобно «спящим красавицам», малым командам нужно десятилетие или больше, чтобы их преобразующие вклад в науку стал виден.

В то же время, анализ 15 миллионов научных публикаций за 1970–2010 годы показал, что в среднем бóльшие команды генерируют работы с большим конечным влиянием, но выигрыш уменьшается после определённого масштаба, и очень крупные консорциумы редко создают статьи с наивысшим влиянием. Это подтверждает наличие **оптимального размера команды** для радикальных инноваций, который значительно меньше, чем размер, необходимый для разработки и масштабирования существующих технологий.

В контексте России, где R&D-ландшафт унаследован от советской системы с её крупными институтами, это означает, что для прорывных инноваций может потребоваться реструктуризация в сторону более мелких, гибких команд, в то время как крупные коллективы остаются востребованными для развития и инжиниринга существующих решений.

8.4. Энергоёмкость передовых технологий как новый ограничитель

Демографический эффект масштаба в инновациях вступает в противоречие с энергетическими ограничениями, когда речь заходит о передовых технологиях — особенно об искусственном интеллекте, космических программах и термоядерных исследованиях.

8.4.1. Искусственный интеллект: энергетический аппетит

Согласно базовому прогнозу Международного энергетического агентства (IEA, 2025), глобальная выработка электроэнергии для питания центров обработки данных вырастет с 460 ТВт·ч в 2024 году до более чем **1 000 ТВт·ч в 2030 году** и **1 300 ТВт·ч в 2035 году**. По некоторым прогнозам, потребление энергии, связанное с ИИ, может подскочить со 100 ТВт·ч в 2025 году до 785 ТВт·ч к 2035 году. Другие оценки показывают, что дата-центры могут потреблять до **1 600 ТВт·ч к 2035 году** — около 4,4% мирового потребления электроэнергии. Если бы дата-центры были страной, они заняли бы четвёртое место по потреблению электроэнергии, уступая только Китаю, США и Индии. К 2030 году, согласно некоторым прогнозам, дата-центры могут потреблять до 945 ТВт·ч, что немного превышает текущее потребление электроэнергии всей Японии. США и Китай являются крупнейшими рынками дата-центров, и в обеих странах бóльшая часть электроэнергии для дата-центров производится из ископаемого топлива. Возобновляемые источники являются самым быстрорастущим источником электроэнергии для дата-центров, но природный газ и уголь вместе, как ожидается, обеспечат более 40% дополнительного спроса на электроэнергию со стороны дата-центров до 2030 года.

Для системного EROI это означает, что «неосязаемая» экономика знаний имеет очень осязаемый углеродный и энергетический след. ИИ-модели, воплощение демографического

и технологического масштаба (разрабатываемые крупнейшими исследовательскими командами в крупнейших странах), потребляют энергию, которая могла бы пойти на другие нужды. В условиях падающего EROI (с 11:1 в 2025 г. до 6:1–7:1 в 2050 г.) этот растущий спрос создаёт дополнительное давление.

8.4.2. Космические программы и термоядерный синтез

Космические исследования традиционно требуют экстремально высоких энергозатрат на единицу полезной нагрузки. Снижение EROI увеличивает стоимость запусков и поддержки орбитальных станций, что может замедлить развитие космической экономики.

Термоядерные исследования, хотя и обещают в конечном итоге высокий EROI, на этапе разработки потребляют значительные объёмы энергии для работы магнитных ловушек и лазерных систем. Таким образом, парадоксальным образом прорывные технологии, призванные решить энергетическую проблему, сами усугубляют её на этапе исследований и разработок.

8.5. Интеграция: демография, энергия и EROI

Взаимосвязь между численностью населения, инновационной эффективностью и EROI создаёт несколько важных динамик:

1. Демографический дивиденд и энергетический императив. Крупные страны с быстрорастущим населением (Индия, Нигерия, ДР Конго) имеют потенциальное демографическое преимущество для инноваций (больше изобретателей, большой рынок). Однако без адекватной энерговооружённости это преимущество остаётся нереализованным. Низкий EROI и высокая стоимость энергии консервируют бедность и не позволяют этим странам создать инновационную экономику.

2. Инновационная частота как заместитель численности. Когда инновации происходят часто (как в сфере ИИ), влияние размера популяции на технологический прогресс уменьшается. Это означает, что высокотехнологичные страны с высокой инновационной интенсивностью могут частично компенсировать меньшую численность населения (например, Израиль, Сингапур, Финляндия). Однако высокая инновационная частота требует значительных инвестиций в R&D и, как показано выше, высоких энергозатрат.

3. Энергетический порог для инновационного масштаба. Инновации в современной экономике всё больше зависят от вычислительных мощностей (ИИ, симуляции, большие данные). А эти мощности, в свою очередь, зависят от доступа к дешёвой и обильной электроэнергии. Падение EROI делает электроэнергию дороже, что может замедлить инновационный процесс в самых передовых его областях, создавая петлю обратной связи.

8.6. Последствия для прогнозных групп

Возвращаясь к четырём прогнозным группам из раздела 5, можно оценить их уязвимость к демографически-инновационным ограничениям:

Группа	Демографический потенциал	Энерговооружённость (ГДж/чел.)	Инновационная частота	Прогноз инновационного развития
I. Зелёный авангард	Средний (650 млн чел.)	110 (к 2050 г.)	Высокая	Инновации поддерживаются за счёт высокой частоты, несмотря на снижение энерговооружённости. Уязвимость к импорту энергии.
II. Нефтегазовые гиганты	Низкий (Россия — 145 млн, США — 340 млн)	180 (Россия) / 250 (США)	Средняя (Россия) / Высокая (США)	США сохраняют инновационное лидерство за счёт высокой частоты и энерговооружённости. Россия рискует отстать из-за низкой инновационной частоты.
III. Догоняющие гиганты	Высокий (Китай — 1,4 млрд, Индия — 1,4 млрд)	60 (к 2050 г.)	Растёт (Китай) / Низкая (Индия)	Китай может реализовать демографический дивиденд за счёт быстрого роста инновационной частоты. Индия рискует остаться в ловушке из-за низкой энерговооружённости.
IV. Энергетическая бедность	Высокий (Африка — 1,5 млрд к 2050 г.)	15 (к 2050 г.)	Очень низкая	Демографическое преимущество нереализуемо из-за критически низкой энерговооружённости. Риск демографически-энергетической ловушки.

8.7. Политические рекомендации

На основе проведённого анализа можно сформулировать следующие рекомендации для разных типов стран:

Для стран с крупным населением, но низкой энерговооружённостью (Группа IV и частично Группа III):

- Приоритет 1: Обеспечение базовой энерговооружённости (через уголь, гидро, солнечную энергию) для создания условий для инноваций.
- Приоритет 2: Инвестиции в образование и подготовку исследователей, чтобы конвертировать демографический размер в инновационную частоту.
- Приоритет 3: Создание «инновационных коридоров» — плотных городских агломераций с хорошей транспортной связностью в пределах 20 км, где могут эффективно работать механизмы знаниевых спилловеров.

Для стран с высоким EROI, но низкой инновационной частотой (Россия, Канада, Австралия):

- Приоритет 1: Повышение инновационной частоты через увеличение R&D-расходов и создание условий для малых, разрушительных исследовательских команд.
- Приоритет 2: Использование энергетического изобилия для питания энергоёмких вычислительных инфраструктур (суперкомпьютеры, центры ИИ).

- Приоритет 3: Международная кооперация для доступа к глобальным интеллектуальным сетям.

Для стран с высоким EROI и высокой инновационной частотой (США):

- Приоритет 1: Управление энергопотреблением ИИ и дата-центров, чтобы инновационный рост не вступал в противоречие с энергетической устойчивостью.
- Приоритет 2: Поддержка малых команд наряду с крупными исследовательскими консорциумами.

Для стран Группы I («Зелёный авангард») с высокими инновациями, но низким EROI:

- Приоритет 1: Диверсификация источников энергии для обеспечения энергетической безопасности инновационного сектора.
- Приоритет 2: Развитие энергоэффективных вычислительных технологий (чипы нового поколения, квантовые вычисления).

8.8. Заключение по разделу 8

Анализ взаимосвязи между демографией и инновациями позволяет сделать следующие выводы:

1. **Существует эмпирически подтверждённая связь между численностью населения и инновационной эффективностью, но она не является линейной и имеет важные ограничения.** Критический порог в 10 миллионов человек для знаниевых спилловер-городов указывает на то, что для создания инновационного центра требуется определённая минимальная агломерация.
2. **Пространственная организация важнее абсолютной численности.** Эффект масштаба между популяцией и инновациями проявляется лишь в радиусе около 20 км, за пределами которого добавление населения не увеличивает эффективные взаимодействия.
3. **Инновационная частота может заместить численность.** Когда инновации происходят часто, влияние размера популяции на кумулятивную технологическую культуру уменьшается, а размер популяции в целом имеет ограниченное влияние. Это означает, что небольшие, но технологически интенсивные страны могут конкурировать с демографическими гигантами.
4. **Передовые технологии (ИИ, космос, термояд) предъявляют колоссальные требования к энергосистеме.** Энергопотребление дата-центров может вырасти до 1 300–1 700 ТВт·ч к 2035 году, что создаёт дополнительную нагрузку на глобальную энергосистему в условиях падающего EROI.

5. **Энерговооружённость является критическим фактором, который может «включить» или «выключить» демографический дивиденд.** Страны Группы IV с высоким демографическим ростом, но критически низкой энерговооружённостью (15 ГДж/чел. к 2050 г.) рискуют оказаться в демографически-энергетической ловушке, где население растёт, а инновационный потенциал остаётся нереализованным.
6. **Для России с её относительно невысокой инновационной частотой** стратегия должна включать: (а) использование энергетического изобилия для питания вычислительных инфраструктур; (б) реструктуризацию R&D-ландшафта в сторону более мелких, гибких команд для повышения разрушительного потенциала инноваций; и (в) инвестиции в пространственную связанность исследовательских кластеров в пределах оптимальных 20-километровых радиусов.

В следующем разделе (9) будет представлено **обсуждение и политические рекомендации**, где результаты всех предыдущих разделов будут сведены в единую систему рекомендаций для разных типов стран, включая конкретные предложения по энергетической политике в условиях падающего EROI.

9. Поправка к разделу «Анализ взаимосвязи между демографией и инновациями»: принцип доминирования, ресурсная база и иерархия потребностей

Представленный ранее анализ взаимосвязи демографии и инноваций необходимо дополнить тремя ключевыми положениями, меняющими выводы о том, какие страны обладают реальными возможностями для технологического лидерства.

9.1. «Правило 90/10»: инновационный рынок как олигополия доминантов

Стандартное рассмотрение инноваций через призму корреляции «численность населения — число патентов» упускает главное: **инновационный рынок — это не конкурентный, а олигопольный рынок, подчиняющийся правилу доминирования «победитель получает всё».** Если на смену 80/20 пришло 90/10 было понятно на примере мобильных устройств, то для мира инноваций в целом можно говорить о переходе к правилу **«99/1»** — один или два игрока забирают практически весь технологический пирог. Классическая 80/20 закономерность:

80 % мировых инновационных результатов создаётся 20 % стран — участников инновационной гонки.

Эта закономерность пронизывает всё: 80 % инновационных стран (США, Китай, Япония, ЕС) сосредотачивают 80 % глобальных R&D-расходов, а лидеры инноваций стабильно формируют 20 % патентов, обеспечивающих 80 % рыночного эффекта. В высокотехнологичных секторах разрыв ещё глубже: например, в хирургической

робототехнике одна страна — США — контролирует 86 % глобального рынка, в генеративном искусственном интеллекте Штаты также занимают доминирующее положение, и лишь Китай заметно выделяется в некоторых смежных подполях. Следовательно, корреляция «чем больше численность населения, тем сильнее инновации» исчезает: важнее не столько абсолютное количество людей, сколько **принадлежность к группе глобальных доминантов** — тем, кто диктует стандарты, темпы и направления технологического развития.

9.2. Механизм: почему рынки делят двое

Нобелевская премия по экономике 2014 года была присуждена Жану Тиролю за анализ рыночной власти в условиях олигополии (работы, датируемые 1988 годом и ранее). В основе модели Тироля лежит следующая логика: в отраслях с высокими постоянными издержками (а R&D-интенсивные индустрии именно таковы) и сетевыми эффектами (чем больше пользователей технологии, тем она ценнее) рынок естественным образом консолидируется вокруг двух–трёх игроков. Поскольку между ними образуется олигополия с неценовой конкуренцией, первый игрок (технологический лидер) задаёт стандарт, второй — догоняет с альтернативным решением, а третий практически не получает прибыли. Именно поэтому венчурные капиталисты вкладываются только в стартапы, претендующие на то, чтобы **стать первыми или максимум вторыми** в новой нише, а господствующие корпорации систематически поглощают перспективные малые инновационные компании. Следовательно, инновационный рынок — это не диффузная технологическая демократия, а постоянная борьба за единственное место лидера.

9.3. Крупная демография как необходимое условие для капиталоемких инноваций

Как доминирование на глобальном инновационном рынке связано с абсолютной численностью населения? Ключевая связь пролегает через **иерархию типов инноваций по степени капиталоемкости и длительности цикла реализации**, которая, в свою очередь, может быть концептуализирована через переосмысление **пирамиды потребностей Абрахама Маслоу** применительно к инновациям на уровне общества (в отличие от индивидуальной мотивации). Если рассматривать общество в целом, то оно проходит те же этапы: сначала удовлетворяются базовые материальные потребности (энергия, продовольствие, жильё, здравоохранение), и лишь затем высвобождаются ресурсы для инноваций с длинным горизонтом окупаемости. В свою очередь:

- **Нижний уровень инноваций** (локальные улучшения, адаптация существующих технологий) доступен обществам даже с небольшим населением — достаточно иметь несколько тысяч инженеров.
- **Средний уровень инноваций** (отраслевые прорывы: новые материалы, фармпрепараты, модели ИИ) требует гораздо большего масштаба: как минимум миллионы потребителей для окупаемости и десятки тысяч исследователей для генерации идей.

- **Высший уровень инноваций** (ядерные реакторы IV поколения, полномасштабные космические программы, управляемый термоядерный синтез, создание новой вычислительной архитектуры) характеризуется:
 - **Длительным циклом R&D** (10–30 лет от идеи до внедрения);
 - **Экстремальной капиталоемкостью** (десятки и сотни миллиардов долларов);
 - **Высоким риском неудачи** (неудачные проекты не возвращают вложенных средств);
 - **Огромным рынком сбыта**, который может окупить инвестиции только в масштабе миллиардов потребителей.

Такие проекты **не могут быть реализованы малой страной с населением 5–10 млн человек**, даже при очень высоком ВВП на душу. У них просто не хватит ни налоговой базы для финансирования, ни внутреннего рынка для окупаемости, ни необходимого **разнообразия компетенций и научных школ** (согласно работам по экономике инноваций, разнообразие идей растёт с размером популяции). В этом смысле крупная численность населения — не достаточное, но **необходимое условие** для удержания позиции в группе инновационных доминантов, способных реализовывать инновации высшего уровня.

9.4. Динамика: закон Мура как «эстафета доминирования»

Важно подчеркнуть, что состав «доминирующей двойки» не фиксирован навечно. Технологические циклы подчиняются регулярным сменам лидеров: закон Мура (удвоение числа транзисторов каждые 18–24 месяца) — это на самом деле **эстафета**, в которой двигателем прогресса поочерёдно выступают разные игроки. Технология, совершившая прорыв на одном этапе, через 10–15 лет уступает место новой, разработанной другим игроком. Именно эта динамика создаёт теоретическое окно возможностей для догоняющих стран: олигополия не статична.

Однако, как было показано на эмпирических данных за 2023–2025 годы, далеко не все страны способны этим воспользоваться. На сегодняшний день только три экономики стабильно генерируют радикальные новшества (patents), которые затем распространяются по всему миру: США, Китай и в значительно меньшей степени страны Евросоюза. Причём в передаче инноваций ЕС **значительно медленнее** реплицирует радикальные новшества из США и Китая, тогда как эти две сверхдержавы быстро копируют европейские прорывы. Это означает, что **отрыв группы доминантов от остального мира продолжает расти**, а порог вхождения в клуб технологических лидеров становится всё выше.

9.5. Россия: численность без инновационной эффективности

Россия является наглядным примером того, как **численность населения перестаёт работать без соответствующей инновационной экосистемы**. Обладая населением около 145 млн человек (1,8 % глобальной численности), страна занимает лишь **60-е место в Глобальном инновационном индексе за 2025 год (GII 2025)**, уступая не только Китаю и США, но и

Эстонии (16-е место), Литве (33-е) и Латвии (41-е). Расходы на R&D составляют менее 1 % ВВП (0,99 % в 2021 году), при этом они критически зависят от бюджетного финансирования — частный сектор инвестирует в 2,3 раза меньше, чем в США. Резкое сокращение численности исследовательского корпуса до 34 % от уровня 1990 года вместе с многократным сжатием числа защищаемых диссертаций диагностирует не просто стагнацию, а **системную эрозию научного потенциала** (по подробным данным из российских источников). Россия сохраняет коммерциализационную воронку инноваций, которая оказывается чрезвычайно узкой: сильная академическая наука генерирует качественные публикации, но они редко превращаются в рыночные продукты.

Страна продуцирует **количественно много** — достаточно много патентов на душу населения, что указывает на высокую изобретательность россиян. Однако эти изобретения не становятся доминирующими глобальными стандартами, не формируют многомиллиардные рынки и не входят в число радикальных новшеств, задающих тон технологическому развитию мира. Иными словами, Россия находится в **ловушке среднего уровня инноваций**: она производит слишком много, чтобы игнорироваться, и слишком мало, чтобы влиять на мировую технологическую повестку. Данные источников о политических целях по удвоению показателей к 2030 году достигают в основном лишь количественных показателей, при том что качественный разрыв от глобальных доминантов оценивается всего в 4 балла индекса (30,3 против 31,49 в среднем по миру). В этой связи России для попадания в клуб глобальных доминантов необходимы **не просто большие R&D-траты**, а полностью инновационная сетевая синергия — капитал образования и промышленности.

9.6. Последствия для прогнозных групп с учётом правила доминирования

Возвращаясь к четырём группам (раздел 5), можно пересмотреть их перспективы с учётом введённых принципов:

Группа / Ядро олигополии	Статус в 2025 г.	Вероятность удержания клуб доминантов	Необходимые ресурсы и условия
США	Безусловный лидер в квантовых, генеративных и хирургических технологиях	Высокая — инновационная эффективность, капиталы, венчурная среда	
Китай	Доминирует в полупроводниках (кроме дизайна) и аэрокосмической роботике	Растущая — численность, госинвестиции, целеполагание	
ЕС	Быстрое отставание, медленное реплицирование новаций	Низкая — фрагментация, дефицит венчурного капитала, «ловушка средних технологий»	
Япония, Южная Корея	Технологически сильны, но уступают США и Китаю в радикальных новшествах	Умеренная — сохранение ниш, но не глобальное доминирование	

Россия	60-е место GII, высокий изобретательский потенциал, но слабая коммерциализация	Низкая — структурные реформы нужны, иначе выпадение из клуба лидеров	
Индия, Бразилия	Растущая экономика, человеческий капитал, но ограниченная R&D база	Неопределённая — демографический дивиденд зависит от долгосрочных инвестиций	
Африка южнее Сахары (Группа IV)	Крайне низкий инновационный потенциал	Близкая к нулю — энергодефицит, слабость институтов	

Инновационная эффективность России может быть охарактеризована формулой: «на выходе мы имеем много публикаций, много патентов, но мало доминирующих технологий». Россия генерирует инновации, сопоставимые с ведущими странами по изобретательству населения, но из-за слабой коммерциализации фундаментальных исследований большинство российских изобретений остаются невостребованными.

9.7. Пересмотр выигрыша России от технологической оптимизации

С учётом правила доминирования 90/10 и текущей модели инноваций, **сама по себе технологическая оптимизация нефтегазового сектора (раздел 6) не выводит Россию в клуб глобальных лидеров** по той простой причине, что эти технологии относятся к **среднему, а не высшему уровню инноваций**. Речь идёт о догоняющей модернизации, а не о создании новых глобальных рынков. Поэтому вывод раздела 6.4 о выигрыше 50–60 лет до падения EROI до 6:1 **следует скорректировать с учётом того, что Россия может остаться в группе «энергетических гигантов» (Группа II), не перейдя в Группу I («Зелёный авангард»)** и не став глобальным инновационным лидером.

Стратегический выбор для России лежит не между «катастрофой» и «технологическим прорывом», а между **сохранением статуса сильного регионального игрока с нефтегазовой экономикой** (при оптимизации EROI) или **попыткой рывка в высший инновационный дивизион** через создание собственных **капиталоёмких инноваций с длинным циклом** (космос, ядерные и водородные технологии нового поколения, биотех). Однако такой рывок требует не просто инвестиций, а **выхода за рамки текущей олигопольной конфигурации, что маловероятно без беспрецедентной государственной воли и кооперации с другими странами (Индия, Китай, страны Персидского залива), способными предоставить и рынки, и капиталы**. Россия к 2026 году владеет серьёзными прорывными компетенциями, в том числе в замкнутом ядерном топливном цикле (проект «Прорыв»), и может попытаться использовать их в качестве «технологического козыря» для создания новой коалиции, альтернативной доминированию США и Китая. Однако этот путь сопряжён с колоссальными рисками, в первую очередь политического характера санкционного режима, а в долгосрочной перспективе — с энергетическим дефицитом инновационных сверхдержав.

9.8. Корректировка вывода по разделу 8-9

Исходный вывод (раздел 8.8) о том, что «размер популяции имеет ограниченное влияние на кумулятивную технологическую культуру», остаётся верным лишь для **инноваций низшего и среднего уровня**. Для **инноваций высшего уровня (капиталоёмких, с длинным циклом)** размер популяции является **критическим необходимым условием**. Однако даже при наличии большой численности населения для превращения её в технологическое доминирование необходимы:

1. **Инновационная экосистема**, обеспечивающая высокую частоту изобретений и их быструю диффузию.
2. **Развитый венчурный капитал** (или государственные инвестиции в соответствующих масштабах) для финансирования проектов с длительным горизонтом окупаемости.
3. **Достаточно ёмкий внутренний рынок** (или доступ к глобальному), чтобы окупить затраты на разработку.
4. **Высокий уровень энерговооружённости экономики**, позволяющей обеспечить ресурсами наукоёмкие отрасли.

Что касается поддержания лидерства в инновациях в условиях длительного энергоперехода и падения среднемирового EROI, страны Группы I — лидеры и доминанты — обладают уникальными преимуществами. Накопленный технологический опыт диктует международные стандарты в электронике, фармацевтике и аэрокосмической отрасли, а мировой рынок вынужден под них подстраиваться. Значит, даже при **импортной зависимости** по энергоносителям эти государства не столь уязвимы, как это представлялось ранее в разделе 5, так как их технологическая рента не связана напрямую с EROI. Россия же, даже оставаясь в группе «энергетических гигантов» (Группа II), может поддерживать статус влиятельного регионального центра, но для перехода в Группу I и тем более для доминирования ей потребуется реализовать комплексную инновационную стратегию, выходящую далеко за рамки повышения энергоэффективности.

Окончательный пересмотренный вывод раздела 8-9:

На инновационном рынке высшего уровня доминируют 1–2 страны (в настоящее время США и Китай), контролирующие до 90 % капиталоёмких прорывных направлений. Крупная численность населения является **необходимым, но не достаточным** условием для попадания в эту группу. Россия, обладая значительным демографическим и изобретательским потенциалом, находится в **инновационной ловушке**: её предложение инноваций достаточно для поддержания статуса региональной державы, но недостаточно для глобального доминирования. Технологическая оптимизация нефтегазового сектора (раздел 6) не меняет эту траекторию. Для реального прорыва России необходимо не только повышать EROI и энергоэффективность текущей модели, но и формировать принципиально новую инновационную экосистему, способную генерировать **капиталоёмкие инновации мирового уровня с длительным горизонтом окупаемости**, а также создавать альянсы с

другими крупными развивающимися экономиками для преодоления барьеров входа в клуб технологических доминантов.

Раздел 10. Обсуждение и политические рекомендации

В данном разделе синтезируются ключевые результаты проведённого исследования и формулируются практические рекомендации для различных групп стран, а также для международных организаций. Обсуждение строится вокруг центрального противоречия: глобальный EROI неуклонно снижается, но страны входят в этот процесс с совершенно разными стартовыми условиями и потенциалом адаптации.

10.1. Синтез основных результатов

1. **EROI как фундаментальный лимитирующий фактор.** С 1930-х годов глобальный EROI ископаемого топлива снизился со 100:1 до 11:1 в 2025 г., и падение продолжается с ускорением (~0,28–0,35 пункта в год). Наиболее вероятный («нейтральный») сценарий предполагает достижение системного EROI = 7:1 к 2047 г. и 6:1 к 2050 г., что вызовет глобальную энергетическую рецессию — замедление экономического роста до 0–0,5 % в год в развитых странах и стагнацию в развивающихся.
2. **Расходящиеся траектории четырёх групп стран.** Кластерный анализ подтвердил наличие четырёх прогнозных групп с кардинально различной уязвимостью и адаптивностью:
 - **Группа I («Зелёный авангард»)** — высокая энергоэффективность и технологический уровень, но критическая зависимость от импорта энергии (62 %). Без импорта их собственные ГЭС+АЭС покрывают лишь 21 % внутреннего спроса.
 - **Группа II («Нефтегазовые гиганты»)** — высокий собственный EROI (11,5), но быстрый темп его падения из-за истощения лёгких запасов; демографически разрежены, что повышает транспортные издержки.
 - **Группа III («Догоняющие гиганты»)** — огромное население и растущий спрос на энергию, низкая энергоэффективность, угольная зависимость; их решения (особенно Китая) определяют глобальную динамику EROI.
 - **Группа IV («Энергетическая бедность»)** — критически низкий EROI (4,5), импортная зависимость при отсутствии финансов, консервация отставания, риск гуманитарной катастрофы.
3. **Технологическая оптимизация способна отодвинуть порог, но не изменить правила игры.** Для России системное внедрение расширенного технологического пакета (включая замкнутый ядерный цикл, ИИ-сети, тепловые насосы, утилизацию отходов, «зелёное» строительство) может повысить EROI на 5,0–5,75 пункта и отодвинуть достижение порога 6:1 с 2043 г. до 2085–2100 гг. Однако для перехода в Группу I и

тем более для глобального технологического доминирования этого недостаточно — необходима трансформация всей инновационной экосистемы.

4. **EROI и рынок недвижимости: скрытая связь.** Три механизма (удорожание стройматериалов, капитализация эксплуатационных расходов, давление на платёжеспособный спрос) создают устойчивую зависимость: падение EROI ведёт к росту реальных цен на жильё (эластичность 0,2–0,5), а также увеличивает премию за энергоэффективность (до 20–30 % в России). Это создаёт новые риски для банков и домохозяйств, владеющих неэффективным жильём.
5. **Демография и инновации: правило доминирования (90/10).** Вопреки расхожим представлениям, просто большая численность населения не гарантирует инновационного лидерства. Рынок капиталоемких инноваций с длинным циклом реализации подчиняется олигопольному принципу, за который была присуждена Нобелевская премия Тиролю: 1–2 доминирующих игрока захватывают до 90 % рыночной выгоды. Для реализации прорывных технологий (ядерный синтез, космос, квантовые вычисления) необходима ресурсная база, которая в современной модели держится на численности населения, но лишь при условии зрелой инновационной экосистемы (высокая частота инноваций, венчурный капитал, ёмкий рынок). Россия демонстрирует классическую «ловушку среднего уровня»: много патентов и изобретений, но отсутствие глобально доминирующих стандартов.

10.2. Рекомендации для стран Группы I («Зелёный авангард»)

Основной вызов: импортная энергозависимость и падение EROI импортируемых ресурсов.

Рекомендации:

1. **Ускоренное развёртывание систем хранения энергии.** Поскольку буферизированный EROI солнечной и ветровой энергии остаётся низким (1,6:1–3,9:1), необходимо субсидировать не только генерацию, но и накопители (включая альтернативы литий-ионным — натрий-серные, проточные батареи). Целевой показатель — не менее 4 часов автономии для 80 % возобновляемой мощности к 2035 г.
2. **Развитие малых модульных реакторов (SMR) и ЗЯТЦ.** Поскольку собственная гидроэнергетика ограничена, атомная энергетика с замкнутым циклом (как в российском проекте «Прорыв») может обеспечить базовую нагрузку с высоким EROI (>100:1). Рекомендуется создание европейского альянса по ЗЯТЦ.
3. **Обязательная маркировка энергоэффективности при продаже/аренде недвижимости** (по опыту Канберры, где доля энергоэффективных домов достигла 72 %). Внедрение «зелёных» ипотечных продуктов с пониженной ставкой для домов класса А и выше.
4. **Нормирование энергопотребления через углеродные налоги и индивидуальные квоты** (как в пилотных проектах в Финляндии и Канаде). Это снизит спрос и уменьшит зависимость от импорта.

5. **Инвестиции в тепловые насосы и реновацию зданий.** Целевой показатель — не менее 50 % домохозяйств с тепловыми насосами к 2040 г. (в северной Европе это уже 30–40 %).

10.3. Рекомендации для стран Группы II («Нефтегазовые гиганты») — фокус на Россию

Основной вызов: падение EROI собственной добычи, сырьевая зависимость, низкая инновационная эффективность.

Рекомендации (дополняющие раздел 6.6):

1. **Использование выигрыша по EROI (50–60 лет) для структурной трансформации экономики.** Нефтегазовые доходы следует направлять не на новые трудноизвлекаемые проекты с EROI 4:1–5:1, а в фонд будущих поколений (по примеру Норвегии) и в развитие человеческого капитала (образование, наука).
2. **Запуск национальной инновационной программы, нацеленной не на количество патентов, а на создание хотя бы 2–3 глобально доминирующих технологических стандартов** (например, замкнутый ядерный цикл, водородная энергетика для холодного климата, криогенные технологии СПГ). Нужно перейти от «догоняющей модернизации» к попытке создать новую рыночную нишу.
3. **Формирование технологических альянсов с быстрорастущими странами Группы III** (Индия, Индонезия, Бразилия) и со странами Персидского залива. Цель — создать альтернативный центр инноваций, не зависящий от лицензий США и Китая.
4. **Реформа R&D-сферы:** переход от крупных академических институтов к гибким проектным командам размером 5–15 человек (согласно выводам раздела 8, малые команды генерируют более разрушительные инновации). Внедрение венчурного финансирования и стартап-акселераторов при университетах.
5. **Использование криорекуператоров и пиролиза** не только для повышения EROI, но и для развития распределённой энергетики в удалённых регионах (Сибирь, Дальний Восток), снижая транспортные потери.

10.4. Рекомендации для стран Группы III («Догоняющие гиганты»)

Основной вызов: быстрый рост спроса на энергию при низкой энергоэффективности и ограниченных инвестициях.

Рекомендации:

1. **Переход от угля к газу и атомной энергии как наиболее реалистичный путь повышения EROI.** Для Китая и Индии на ближайшие 20 лет газ (EROI 20:1–30:1) и АЭС (EROI 50:1–75:1) должны замещать уголь (EROI 25:1–30:1, но с высокими выбросами). ВИЭ дополнять, но не замещать базовую генерацию.

2. **Огромный потенциал энергоэффективности в промышленности и строительстве.** Применение тепловых насосов, рекуперации тепла, электромобилей на общественном транспорте. Целевой показатель — снижение энергоёмкости ВВП на 3–4 % в год.
3. **Создание «инновационных коридоров» — плотных городских агломераций с населением более 10 млн человек, в которых будут сконцентрированы R&D-центры, университеты и венчурные фонды.** Как показано в разделе 8, знаниевые спилловеры эффективны в радиусе 20 км, поэтому необходимы инвестиции в метро/ВСМ и коворкинги.
4. **Использование демографического дивиденда для перехода от «количества» инноваций к «качеству».** Китай уже на этом пути (21 % мировых исследователей), Индии и Индонезии нужно увеличить расходы на R&D с текущих <0,7 % ВВП до хотя бы 1,5 % к 2035 г.

10.5. Рекомендации для стран Группы IV («Энергетическая бедность»)

Основной вызов: экстремально низкий EROI (<5:1), отсутствие доступа к капиталу и технологиям.

Рекомендации (с опорой на принцип климатической справедливости):

1. **Глобальный фонд энергетического перехода** (предлагаемый размер — \$100 млрд в год), финансируемый за счёт налога на сверхприбыль нефтегазовых компаний (Группа II) и углеродного налога в Группе I. Средства направлять на децентрализованную солнечную энергетику с базовыми накопителями (даже при низком буферизированном EROI это лучше, чем отсутствие энергии) и на малые ГЭС там, где есть гидропотенциал (ДР Конго, Эфиопия).
2. **Техническая помощь в повышении энергоэффективности** — самые дешёвые меры (замена двигателей, утепление зданий, LED-освещение) дают быстрый рост EROI на локальном уровне.
3. **Планирование семьи и урбанизация** для снижения демографического давления и повышения доли городского населения (где легче предоставлять энергоуслуги).
4. **Региональная интеграция** — создание общих энергосетей (например, Западная Африка, Восточная Африка), чтобы снизить затраты на импорт и распределение.

10.6. Глобальные рекомендации (для международных организаций)

1. **Признать EROI официальным индикатором энергетической безопасности** (наряду с ценой и доступностью). IEA, IRENA и World Bank следует включить мониторинг EROI в ежегодные обзоры и сценарии.

2. **Пересмотреть сценарии энергоперехода:** большинство текущих прогнозов (например, IEA Net Zero 2050) игнорируют буферизированный EROI ВИЭ и ошибочно предполагают линейное замещение ископаемого топлива. Необходимо ввести обязательный расчёт системного EROI для любых национальных энергетических стратегий.
3. **Создать Глобальный Альянс по повышению EROI** — платформа для обмена технологиями между Группой I (Smart Grids, тепловые насосы), Группой II (замкнутый ядерный цикл, криотехнологии) и Группой III (энергоэффективность в промышленности). Первоочередные задачи: стандартизация методик расчёта EROI, база данных EROI месторождений и технологий.
4. **Ввести глобальный налог на ископаемое топливо с $EROI < 8:1$** для финансирования фонда энергоперехода (Группа IV). Такие проекты (сланцевая нефть, арктическая добыча, нефтеносные пески) дают низкий чистый энергетический выход и наносят непропорционально большой экологический ущерб.
5. **Стимулировать R&D в области хранения энергии и сверхпроводников.** Увеличение буферизированного EROI солнечной и ветровой энергии является наиболее критической технологической задачей (сейчас $1,6:1$ – $3,9:1$ — необходимо поднять до хотя бы $8:1$ – $10:1$).

10.7. Обсуждение ограничений исследования

1. **Неопределённость будущих технологических прорывов.** Оптимистический сценарий (управляемый термояд, сверхпроводники) имеет лишь 15 % вероятности по нашей оценке, но полностью изменит все выводы. Политикам следует выделять 5–10 % энергобюджета на «ставки высокого риска» (например, международный проект DEMO).
2. **Игнорирование климатической обратной связи.** Падение EROI может ускориться из-за климатических ограничений (углеродные налоги, штрафы за выбросы), что мы не моделировали количественно. Возможно, нейтральный сценарий окажется ближе к катастрофическому при ужесточении климатической политики.
3. **Геополитическая фрагментация как переменная.** В модели сценариев мы использовали фиксированный индекс сотрудничества, но он может резко ухудшиться (например, конфликт за Тайвань) или улучшиться (глобальный климатический кризис, заставляющий объединиться). Рекомендуется последующий анализ чувствительности.
4. **Методологические расхождения в расчете EROI.** Для атомной энергетики разброс достигает $5:1$ – $106:1$. В работе использованы консенсусные оценки Weißbach et al. (2013), но для политических решений необходимо проводить расчёты по единой стандартизированной методике (предлагается Международной ассоциацией энергоэкономики).

10.8. Направления будущих исследований

1. **Детальное моделирование буферизированного EROI для различных климатических зон.** Для солнечной энергетики в Германии EROI может быть в 2–3 раза ниже, чем в Сахаре; для ветра — офшор лучше наземного. Необходима глобальная карта EROI ВИЭ с учётом хранения.
2. **Влияние EROI на социальную стабильность и миграцию.** Эмпирическая проверка гипотезы о том, что падение EROI ниже 8:1 коррелирует с ростом социальных конфликтов (на исторических данных нефтяных шоков).
3. **Эконометрический анализ связи EROI и финансовых пузырей** (кроме недвижимости) — фондовый рынок, криптовалюты, сырьевые активы.
4. **Сценарный анализ с учётом различных траекторий Китая и Индии** — наиболее чувствительный фактор для глобального EROI. Разработка открытой модели в духе IPCC, но с фокусом на энергофизику (EROI), а не только на климат.
5. **Психологические и социологические исследования восприятия энергетической рецессии** — как население адаптируется к нормированию энергии, отказу от личного транспорта и т.д.

Раздел 11. Заключение

11.1. Резюме ключевых выводов

Настоящее исследование было посвящено количественному и структурному анализу последствий падения глобальной энергетической рентабельности (EROI) для экономического роста, демографического распределения, рынков активов и энергетической политики. На основе ретроспективных данных (1920–2025 гг.), сценарного моделирования до 2050–2100 гг., кластерного анализа 50 стран, кейса технологической оптимизации России, эмпирической проверки связи EROI с рынком недвижимости и пересмотра демографически-инновационной взаимосвязи с учётом правила олигопольного доминирования (90/10) получены следующие основные результаты.

11.1.1. EROI как фундаментальный ограничитель

Падение EROI не является гипотетической угрозой, а представляет собой уже происходящий долговременный процесс. С 1930-х годов EROI мировой нефти снизился со 100:1 до 7:1–11:1, газа — с 150:1 до 10:1–20:1. Скорость падения ускорилась после 2000 года и составляет в среднем 0,28–0,35 пункта в год. Наиболее вероятный («нейтральный») сценарий предполагает достижение глобальным системным EROI порога 7:1 к 2047 году и 6:1 к 2050 году. Это вызовет **глобальную энергетическую рецессию** — прекращение экономического роста в развитых странах (0–0,5 % в год), стагнацию в развивающихся,

нормирование энергопотребления и снижение уровня жизни на 30–40 % в странах Группы I (по потреблению энергии на душу) и полную консервацию бедности в Группе IV.

11.1.2. Расходящиеся траектории четырёх прогнозных групп

Кластерный анализ по пяти признакам (EROI национальной системы, доля импорта, ВВП на душу, плотность населения, энергоэффективность) выделил четыре группы с кардинально разной уязвимостью и адаптивностью.

- **Группа I («Зелёный авангард»)** — высокая эффективность, но критическая импортная зависимость (62 %). При гипотетическом прекращении импорта доступная энергия снижается до 26,25 ЭДж, а ГЭС+АЭС покрывают лишь 21 % внутреннего спроса.
- **Группа II («Нефтегазовые гиганты»)** — высокий текущий EROI (11,5), но быстрое падение из-за истощения лёгких запасов; низкая плотность населения (28 чел/км²) увеличивает транспортные издержки.
- **Группа III («Догоняющие гиганты»)** — огромное население, низкая энергоэффективность (EE_index 0,73), высокая угольная зависимость. Их решения (особенно Китая) определяют глобальную динамику EROI.
- **Группа IV («Энергетическая бедность»)** — уже сейчас EROI ниже критического (4,5), отсутствие доступа к капиталу, риск гуманитарной катастрофы.

11.1.3. Технологическая оптимизация способна радикально отодвинуть порог, но не изменить правило доминирования

Для России (как представителя Группы II) системное внедрение расширенного технологического пакета (горизонтальное бурение, утилизация ПНГ, криочистка, криорекуператоры, пиролиз, отказ от личного транспорта + дополнительные технологии: замкнутый ядерный цикл — ЗЯТЦ, ИИ и Smart Grids, тепловые насосы, утилизация промышленных отходов, «зелёные» стандарты, водородная энергетика) даёт повышение EROI на 5,0–5,75 пункта и позволяет отодвинуть достижение критического порога 6:1 с 2043 года до 2085–2100 годов (выигрыш 50–60 лет). Однако такой выигрыш относится к **энергетической эффективности**, а не к **инновационному доминированию**. Для перехода в Группу I и тем более для создания глобальных технологических стандартов необходимо не только повышать EROI, но и трансформировать инновационную экосистему, выходя за рамки догоняющей модернизации.

11.1.4. Эмпирическая связь EROI и рынка недвижимости

Выявлены три механизма связи: удорожание строительных материалов, капитализация эксплуатационных расходов в цене жилья, давление на платёжеспособный спрос. В 14–20 развитых экономиках за 1970–2025 гг. эластичность реальных цен на жильё по EROI составила –0,2...–0,5 (с лагом 3 года). Премия за энергоэффективность жилья составляет 3–15 % в жилом секторе и 13–20 % в коммерческом, а в России из-за сурового климата может

достичь 20–30 % к 2035 году. Неэффективные дома (классы D–E) будут получать растущий «коричневый дисконт», создавая риски для банков и домохозяйств.

11.1.5. Демография и инновации: от корреляции к олигопольному доминированию

Простая корреляция «численность населения — инновации» вводит в заблуждение. Рынок капиталоемких инноваций с длинным циклом реализации подчиняется правилу 90/10 (нобелевская работа Тироля по олигополии): первые два игрока захватывают до 90 % выгоды. Крупная численность населения является **необходимым, но не достаточным** условием доминирования. Необходимы также: зрелая инновационная экосистема, сильный венчурный капитал, ёмкий внутренний рынок и высокая энерговооружённость. Россия, находясь на 60-м месте в Глобальном инновационном индексе (2025), при существенном изобретательском потенциале (много патентов) не создаёт глобально доминирующих стандартов — классическая «ловушка среднего уровня». Инновационная эффективность не вытекает автоматически из энергетической оптимизации.

11.2. Ответы на исследовательские вопросы

1. **Какова историческая динамика EROI?** Показано монотонное падение EROI для всех ископаемых видов топлива, ускорение после 2000 г. до 0,28–0,35 пункта/год, при этом гидро- и атомная энергетика сохраняют высокий EROI (50–100:1), а буферизированный EROI ВИЭ (с хранением) падает до 1,6–5:1.
2. **Когда и как будут пройдены пороги 7:1 и 5:1?** По нейтральному сценарию (вероятность 60 %): порог 7:1 — 2047 г., 6:1 — 2050 г. Катастрофический сценарий (25 %) — 2038 г. достижение 5:1. Оптимистический (15 %) — EROI растёт >20:1.
3. **Как распределятся последствия между странами?** Четыре группы с расходящимися траекториями: Группа I — мягкая посадка со снижением уровня жизни; Группа II — выигрыш времени, но риск сырьевой ловушки; Группа III — определяет глобальный спрос; Группа IV — гуманитарная катастрофа без внешней помощи.
4. **Может ли технологический пакет скорректировать национальную траекторию (кейс России)?** Да, выигрыш 50–60 лет до порога 6:1, но это не автоматически ведёт к инновационному лидерству.
5. **Существует ли эмпирическая связь между EROI и ценами на недвижимость?** Да, эластичность –0,2...–0,5, премия за энергоэффективность до 30 % в России.
6. **Как демография и энерговооружённость связаны с инновациями?** Для инноваций высшего уровня (капиталоемкие, длинный цикл) крупная численность населения является необходимым условием, но недостаточным — требуется инновационная экосистема и венчурный капитал.

11.3. Политические импликации (краткое резюме)

- **Для Группы I:** срочная диверсификация импорта, развёртывание систем хранения энергии, SMR, обязательная маркировка энергоэффективности, тепловые насосы, нормирование через углеродные налоги.
- **Для Группы II (особенно России):** использовать выигрыш 50–60 лет для структурной трансформации, направить нефтегазовые доходы в фонд будущих поколений, создать 2–3 глобально доминирующих стандарта (например, ЗЯТЦ, криогенные технологии), реформировать R&D-сферу в сторону малых проектных команд, формировать альянсы с Группой III.
- **Для Группы III:** переход от угля к газу и атому, колоссальное повышение энергоэффективности, создание «инновационных коридоров» (агломерации >10 млн чел.), увеличение расходов на R&D.
- **Для Группы IV:** глобальный фонд энергоперехода (\$100 млрд/год), децентрализованная солнечная генерация, малые ГЭС, техническая помощь, планирование семьи.
- **Для глобальных институтов:** признать EROI официальным индикатором, пересмотреть сценарии энергоперехода с учётом буферизированного EROI, создать Глобальный Альянс по повышению EROI, ввести налог на ресурсы с EROI <8:1.

11.4. Ограничения и дорожная карта будущих исследований

Ограничения:

- Неопределённость технологических прорывов (15 % вероятности оптимистического сценария).
- Неполный учёт климатической обратной связи и геополитической фрагментации.
- Методологический разброс в расчёте EROI (особенно для атомной энергетики — от 5:1 до 106:1).
- Отсутствие динамической модели, учитывающей двустороннюю связь между EROI и инвестициями.

Будущие исследования (5 направлений):

1. Глобальная карта буферизированного EROI ВИЭ с учётом климатических зон и различных технологий хранения.
2. Эмпирическая проверка связи падения EROI с социальной нестабильностью и миграцией.
3. Эконометрический анализ связи EROI с финансовыми пузырями (кроме недвижимости).

4. Открытая сценарная модель (аналог IPCC) с фокусом на EROI и энергофизику.
5. Социологические исследования восприятия энергетической рецессии и готовности к нормированию.

11.5. Заключительное слово

Человечество стоит перед фундаментальным историческим вызовом. Эпоха сверхдешёвой энергии со 100-кратной отдачей безвозвратно ушла. Мы вступаем в мир, где на каждую единицу затраченной энергии мы получаем не 100, а всего 10–12 единиц — и этот коэффициент продолжит снижаться до 6:1–7:1 к середине века. Это не «конец света», но это конец **неограниченного экспоненциального роста**, каким мы его знали после Второй мировой войны.

Наиболее вероятная траектория — **длительная энергетическая рецессия**, в рамках которой одни страны (Группа I и II) смогут адаптироваться за счёт технологий и эффективности, другие (Группа III) застрянут в углеводородной зависимости, третьи (Группа IV) столкнутся с гуманитарными вызовами. Россия обладает уникальным окном возможностей: благодаря технологической оптимизации она может отодвинуть критический порог EROI на 50–60 лет, получив исторический шанс для структурной перестройки экономики. Однако инновационное доминирование не является автоматическим следствием энергоэффективности — для этого необходима сознательная, скоординированная политика по созданию глобальных технологических стандартов и альянсов.

Главный вывод исследования: политикам, инвесторам и гражданскому обществу следует перестать рассматривать энергетический переход как чисто климатическую или экономическую проблему и начать учитывать **физический императив EROI**. Никакое количество углеродных налогов, субсидий на ВИЭ или рыночных механизмов не отменит закона сохранения энергии и того факта, что при EROI ниже 5:1 сложная индустриальная цивилизация становится энергетически невозможной. Признание этого факта — первый шаг к реалистичной, а не идеологической энергетической политике.

Список литературы

1. Hall C.A.S., Lambert J.G., Balogh S.B. EROI of different fuels and the implications for society // Energy Policy. 2014. Vol. 64. P. 141–152.
2. Murphy D.J. The implications of the declining energy return on investment of oil and gas // Nature Energy. 2024. (в печати)
3. Brockway P.E., Owen A., Brand-Correa L.I., et al. Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with a comparison to renewable energy // Applied Energy. 2019. Vol. 235. P. 122–134.
4. Weißbach D., Ruprecht G., Huke A., et al. Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants // Energy. 2013. Vol. 52. P. 210–221.
5. Energy Institute. Statistical Review of World Energy 2025. London, 2025.
6. Raugei M., Carbajales-Dale M., Barnhart C.J. Energy Return on Investment (EROI) of Solar PV. In: A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems. Elsevier, 2021.
7. Jordà Ò., Knoll K., Kuvshinov D., Schularick M. The Rate of Return on Everything, 1870–2015 // NBER Working Paper No. 24120, 2019.
8. Gao J., Liu W., Fang C. The role of population size in knowledge spillovers: Evidence from Chinese cities // Urban Studies. 2025. (в печати)
9. Bluet A., Osiurak F., Reynaud E. The limited influence of population size on cumulative technological culture // Evolutionary Human Sciences. 2024. Vol. 6.
10. International Energy Agency (IEA). Electricity 2025. Paris, 2025.
11. ВИНТИ РАН. Проблемы энергетической эффективности в РФ: аналитический обзор. Москва, 2025.