

Приложение А. Методики расчёта EROI для каждого источника

Автор: Михайлов Андрей Николаевич

ORCID: 0009-0001-6883-6379

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

Дата: 06.05.2026

Лицензия: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Связанное исследование: «Энергетическая рентабельность (EROI) как фундаментальное ограничение экономического и демографического развития: глобальные сценарии и политические последствия» (препринт, 2026)

Аннотация

В Приложении А представлена унифицированная методика расчёта энергетической рентабельности (EROI) для всех основных типов энергоресурсов: нефти, газа, угля, атомной энергии, гидроэнергетики, ветра, солнца, биотоплива и водорода. Описаны иерархические уровни EROI ($EROI_1$, $EROI_2$, $EROI_3$, $EROI_{std}$) и порядок учёта прямых и косвенных энергозатрат на всех стадиях жизненного цикла. Особое внимание уделено буферизированному EROI для возобновляемых источников с системами хранения энергии. Приводятся эталонные таблицы значений EROI по состоянию на 2024–2025 гг., поправочные коэффициенты для разных климатических зон и пример практического расчёта. Методика является открытой и предназначена для воспроизведения исследователями, ведомствами и аналитическими центрами.

Ключевые слова: EROI, энергетическая рентабельность, методика расчёта, буферизированный EROI, жизненный цикл, ископаемое топливо, возобновляемая энергетика, хранение энергии, национальный EROI.

Оглавление

- А.1. Введение в методологию EROI
- А.2. Общая формула и система обозначений ($EROI_1$, $EROI_2$, $EROI_3$, $EROI_{std}$)
- А.3. Эталонные значения EROI по источникам (сводная таблица)
- А.4. Нефть (традиционная и сланцевая)
- А.5. Природный газ (традиционный, сланцевый, СПГ)
- А.6. Уголь
- А.7. Атомная энергетика

- A.8. Гидроэнергетика (крупная, малая, ГАЭС)
 - A.9. Ветроэнергетика
 - A.10. Солнечная энергетика (фотоэлектрическая, тепловая)
 - A.11. Биотопливо (этанол, биодизель)
 - A.12. Водородная энергетика
 - A.13. Учёт хранения энергии: буферизированный EROI
 - A.14. Особенности расчёта национального EROI (EROI_nat)
 - A.15. Таблицы коэффициентов пересчёта для климатических зон
 - A.16. Практические рекомендации и пример расчёта
 - A.17. Список литературы
-

A.1. Введение в методологию EROI

Energy Return on Investment (EROI) – фундаментальный показатель энергоэффективности, определяемый как отношение количества полезной энергии, поставляемой энергетической системой (или отдельным источником) за весь её жизненный цикл, к суммарной энергии, затраченной на её получение:

$$\text{EROI} = E_{\text{out}} / E_{\text{in}}$$

где E_{out} – полезная энергия, возвращённая обществу, а E_{in} – прямая и косвенная энергия, израсходованная на разведку, добычу, доработку, транспортировку, строительство, обслуживание и вывод из эксплуатации.

EROI – это физический показатель «чистой» энергии, не подверженный валютным колебаниям, субсидиям или политическому давлению. В отличие от стоимостных метрик (LCOE, цена за баррель), он позволяет сравнивать различные источники на системном уровне.

A.1.1. Место EROI среди близких понятий

- **Energy Payback Time (EPBT)** – время, необходимое энергосистеме для генерации энергии, эквивалентной энергии, затраченной на её создание. Связь: чем выше EROI, тем короче EPBT.
- **Net Energy (NE)** – абсолютная величина полезной энергии после вычитания энергозатрат ($E_{\text{out}} - E_{\text{in}}$). Показывает абсолютный масштаб системы (важно, когда EROI низок, но NE колоссален).
- **LCA (Life Cycle Assessment)** – методология оценки полного жизненного цикла, используемая для расчёта E_{in} .

- **NER vs NEER** – Net Energy Ratio включает все формы потребления энергии (включая собственное потребление топлива), Net External Energy Ratio исключает собственное потребление.

A.2. Общая формула и система обозначений

A.2.1. Основные типы EROI

- **EROI₁ (Standard EROI)** – учитывает энергию, израсходованную только на добычу и извлечение ресурса на месте (самый ограниченный показатель).
- **EROI₂** – включает дополнительную энергию на переработку и рафинирование (от сырья до товарного топлива).
- **EROI₃ (Point-of-Use EROI)** – добавляет энергию на транспортировку и распределение до конечного потребителя (наиболее полный показатель для сравнения технологий).
- **EROI_{std} (Standardized EROI)** – единый стандарт, предложенный Murphy (2014), унифицирующий включение всех этапов жизненного цикла, включая строительство и утилизацию.

A.2.2. Структура E_{in}

Систематический учёт энергозатрат включает:

Категория затрат	Составляющие
Прямые энергозатраты	Топливо для буровых, насосов, компрессоров, транспортных средств; электроэнергия для заводов.
Косвенные энергозатраты	Производство оборудования (сталь, пластик, редкоземельные металлы), строительство заводов, трубопроводов, ЛЭП, ремонт.
Затраты на инфраструктуру	Автодороги, вахтовые городки, порты, причалы, цементные и сталелитейные заводы для проекта.
Эксплуатационные затраты	Рекультивация земель, утилизация отходов, плановая замена компонентов (инверторы).
Транспортные затраты	Строительство и эксплуатация трубопроводов, танкеров, ЛЭП.
Конец срока службы (EoL)	Демонтаж, утилизация, рециклинг. Игнорирование EoL может завышать EROI на 5–15%.

A.3. Эталонные значения EROI по источникам (сводная таблица)

Таблица А.1 – Среднемировые оценки EROI₃ (Point-of-Use) для основных источников энергии, 2024–2025 гг.

№	Энергоресурс / Технология	EROI (диапазон)	Тенденция	Особенности учёта
1	Гидроэнергетика (крупная ГЭС)	50:1 – 100:1	Стабильна	Без внешней буферизации; водохранилище – аккумулятор
2	Гидроаккумулирующая (ГАЭС)	35:1 – 60:1	Стабильна	Включая потери на закачку (цикл 70–80%)
3	Атомная энергетика (III пок., открытый цикл)	50:1 – 75:1	Статична	Включая строительство, топливный цикл; разброс 5:1–106:1
4	Атомная энергетика IV поколения (ЗЯТЦ, БРЕСТ)	100:1 – 150:1	Рост	Замкнутый цикл, многократное использование топлива
5	Уголь (открытая добыча, среднемировой)	30:1 – 46:1	Медленное снижение	Пик EROI ожидается 95±15:1 между 2025–2045 гг.
6	Уголь (Китай, глубокие шахты)	20:1 – 25:1	Резкое снижение	Ухудшение качества и глубины
7	Природный газ (традиционный, трубопровод)	20:1 – 30:1	Снижение	Сланцевый газ – около 12:1
8	СПГ (сжиженный природный газ)	10:1 – 15:1	Снижение	Потери на сжижение (5–10%) и регазификацию
9	Нефть (традиционная, Ближний Восток)	15:1 – 20:1	Снижение	Истощение лёгких месторождений
10	Нефть (конвенциональная, прочие регионы)	8:1 – 12:1	Снижение	Среднемировой показатель
11	Сланцевая нефть (tight oil, США)	4,5:1 – 6:1	Резкое снижение	«5:1 и падает» по мере истощения лучших зон
12	Битум (нефтеносные пески, Канада)	3:1 – 5:1	Стагнация	Сверхвысокая энергоёмкость
13	Ветроэнергетика (наземная, без хранения)	15:1 – 20:1	Рост	Monash Univ. 2024 – ~17,2
14	Солнечная ФЭ (без хранения)	8:1 – 10:1	Умеренный рост	Payback период 0,5–2,8 лет

15	Солнечная ФЭ (с батарейным хранением)	2,96:1 – 4:1	Снижение	EROI падает на 45% из-за батарей
16	Ветроэнергетика (с батарейным хранением)	3,9:1 – 5:1	Снижение	Буферизация снижает EROI

Источники: Hall et al., 2014; Weißbach et al., 2013; Raugei, 2025; Malode et al., 2024; Murphy, 2024.

А.4. Нефть (традиционная и сланцевая)

А.4.1. Исторический контекст

1930–1950 гг.: EROI традиционной нефти в США и на Ближнем Востоке достигал 100:1. К 1970 г. снизился до 25:1, к 2000 г. – до 15:1, к 2025 г. среднемировой ~10:1, сланцевая нефть США – 5:1.

А.4.2. Методика расчёта

$$\text{EROI}_{\text{нефть}} = (Q_{\text{pet}} \times CV_{\text{pet}} - E_{\text{self}}) / (E_{\text{expl}} + E_{\text{extr}} + E_{\text{proc}} + E_{\text{transp}} + E_{\text{remed}} + E_{\text{upstream}})$$

где:

- Q_{pet} – объём добытой сырой нефти (барр. или т)
- CV_{pet} – калорийность (5,8 ГДж/барр. или 41,9 ГДж/т)
- E_{self} – потребление собственной энергии нефти (на промысле)
- E_{expl} – энергозатраты на разведку
- E_{extr} – энергозатраты на добычу (бурение, поддержание давления)
- E_{proc} – переработка и рафинирование
- E_{transp} – транспортировка до рынка
- E_{remed} – рекультивация земель

Для сланцевой нефти дополнительно включается энергия на гидроразрыв пласта.

А.5. Природный газ (традиционный, сланцевый, СПГ)

А.5.1. Общая формула

$$\text{EROI}_{\text{газ}} = (Q_{\text{gas}} \times CV_{\text{gas}}) / (E_{\text{expl}} + E_{\text{extr}} + E_{\text{proc}} + E_{\text{transp}} + E_{\text{lng}} + E_{\text{storage}})$$

А.5.2. Особые случаи

Тип газа	Особенности расчёта	Ожидаемый EROI
Традиционный	Трубопроводный транспорт до 5000+ км, потери 10–20%	20:1 – 30:1
Сланцевый газ	Учёт энергии на гидроразрыв (закачка воды, песка, химикатов)	10:1 – 15:1
СПГ	Сжижение (5–10% от энергосодержания) + регазификация + океанская транспортировка	8:1 – 12:1
Попутный нефтяной газ (ПНГ)	Утилизация вместо сжигания; добавленная энергия без дополнительной разведки	стремится к ∞ для утилизированной части

При добыче газа значительная часть газа может потребляться на промысле (компрессоры). Эти объёмы должны быть вычтены из валового E_{out}.

А.6. Уголь

А.6.1. Методика расчёта

$$\text{EROI}_{\text{уголь}} = (Q_{\text{coal}} \times CV_{\text{coal}}) / (E_{\text{direct mining}} + E_{\text{ventilation}} + E_{\text{beneficiation}} + E_{\text{transport}} + E_{\text{reclamation}})$$

CV_{coal} зависит от марки (битуминозный, антрацит).

А.6.2. Тренды

- В Китае EROI устойчиво снижается из-за перехода с карьерной добычи на шахтную.
- Пик EROI угля ожидается между 2025 и 2045 гг. на уровне 95±15:1 (модели HAL).
- Уголь остаётся «амортизатором» глобальной энергосистемы благодаря запасам на 130–150 лет.

А.7. Атомная энергетика

А.7.1. Формула полного жизненного цикла

$$\text{EROI}_{\text{атом}} = E_{\text{electricity}} / (E_{\text{uranium mining}} + E_{\text{enrichment}} + E_{\text{construction}} + E_{\text{O\&M}} + E_{\text{decommissioning}} + E_{\text{waste management}})$$

Компонент	Характеристика
Добыча урана	Энергоёмкая, затраты растут при содержании U < 0,1%
Обогащение	Центрифуги потребляют в 50 раз меньше энергии, чем газодиффузионные заводы

Строительство	Высокие первоначальные затраты, окупаются за 30–50 лет
Эксплуатация (O&M)	Техобслуживание, перегрузка топлива, безопасность
Выведение из эксплуатации	Длительный процесс (10–30 лет), высокие энергозатраты
Хранение отходов	Остекловывание, контейнеризация, изоляция

А.7.2. Открытый и замкнутый циклы

- Открытый цикл (III поколение): EROI 50:1–75:1.
- Замкнутый цикл (IV поколение, БРЕСТ): EROI 100:1–150:1.

А.7.3. Предупреждение о разбросе

Из-за методологических различий оценки EROI атомной энергетики варьируются от 5:1 до 106:1. Настоящее исследование следует физической концепции эксергии Weißbach et al. (2013) для сопоставимости.

А.8. Гидроэнергетика (крупная, малая, ГАЭС)

А.8.1. Метод расчёта (срок службы ≈80–100 лет)

$EROI_{\text{гидро}} = (E_{\text{electricity produced}} \times \text{lifetime}) / (E_{\text{dam construction}} + E_{\text{reservoir preparation}} + E_{\text{O\&M}} + E_{\text{transmission}})$

Тип ГЭС	Диапазон EROI	Комментарий
Крупная ГЭС	50:1 – 100:1	Без учёта затопления территорий; не требует внешней буферизации
Мини-ГЭС (≤10 МВт)	25:1 – 40:1	Меньшая энергоэффективность
ГАЭС	35:1 – 60:1	Включая потери на закачку (КПД цикла 70–80%)

Водоохранилище само является гигантским аккумулятором, поэтому гидроэнергетика не нуждается во внешних системах хранения.

А.9. Ветроэнергетика

А.9.1. Методика расчёта

$$\text{EROI}_{\text{ветер}} = E_{\text{generated}} / (E_{\text{turbine manufacture}} + E_{\text{installation}} + E_{\text{O\&M}} + E_{\text{grid}} + E_{\text{storage}})$$

Тип ВЭС	Без хранения	Буферизированный (с батареями)
Наземная	~17,2:1	3,9:1 – 5,1
Офшорная	10:1 – 15:1	ниже 4:1

А.9.2. Особые случаи

- **Куртаильмент** (сброс мощности) при проникновении >30–40% снижает эффективный EROI.
- **Батарейное хранение** резко снижает EROI (с 17:1 до ~5:1).
- **Эффект масштаба** – увеличение единичной мощности турбины снижает материалоемкость на кВт·ч.

А.10. Солнечная энергетика (фотоэлектрическая, тепловая)

А.10.1. Общая методика

$$\text{EROI}_{\text{солнце}} = E_{\text{generated_over_lifetime}} / (E_{\text{materials}} + E_{\text{manufacturing}} + E_{\text{installation}} + E_{\text{O\&M}} + E_{\text{storage}})$$

А.10.2. Падение EROI от батарейного хранения

Ситуация	EPBT (лет)	EROI	Комментарий
Без батарей, прямая связь с сетью	3,71	5,38	Умеренная инсоляция
С батареями Li-Ion	6,74	2,96	Падение на 45%, ниже порога 5:1

А.10.3. Влияние климатической зоны

- EROI варьируется от 1,6:1 (европейский климат с аккумуляторами) до ~10:1 (Сахара, без хранения).
- В России (Москва) даже без хранения EROI может быть <4:1 из-за низкой инсоляции.

А.11. Биотопливо (этанол, биодизель)

А.11.1. Общая схема расчёта

$$\text{EROI}_{\text{био}} = \text{E}_{\text{fuel_output}} / (\text{E}_{\text{cultivation}} + \text{E}_{\text{fertilizers}} + \text{E}_{\text{harvesting}} + \text{E}_{\text{transport_feedstock}} + \text{E}_{\text{biorefinery}} + \text{E}_{\text{distribution}})$$

Тип биотоплива	Типичный EROI	Особенности
Кукурузный этанол (США)	1,2:1 – 1,8:1	Почти нулевая отдача
Бразильский сахарный этанол	5:1 – 8:1	Не требует орошения; термохимическая переработка жмыха
Биодизель из кукурузного масла	2,5:1 – 4:1	«Бесплатное» сырьё, но требует учёта предыдущего цикла
Целлюлозный этанол	2:1 – 6:1	Перспективно, зависит от сырья

Принцип двойного счёта: побочные продукты (например, кукурузное масло для биодизеля) не должны засчитываться без учёта затрат на основное производство.

А.12. Водородная энергетика

А.12.1. Формула

$$\text{EROI}_{\text{H}_2} = \text{E}_{\text{H}_2\text{_output}} / (\text{E}_{\text{electricity_for_electrolysis}} + \text{E}_{\text{construction_electrolyser}} + \text{E}_{\text{H}_2\text{_compression/liquefaction}} + \text{E}_{\text{transport}})$$

Цвет водорода	EROI (Point-of-Use)	Оговорки
Зелёный H ₂ (электролиз)	1,5:1 – 3:1	Потери 30–40%; при питании от ВИЭ с хранением может быть бессмысленным
Голубой H ₂ (риформинг + CCS)	4:1 – 8:1	CCS снижает EROI на 20–30%
Бирюзовый H ₂ (пиролиз метана)	3:1 – 5:1	Не требует CCS, но энергозатраты высоки

Ни один из методов не обеспечивает EROI >10:1, сравнимый с прямым использованием ископаемого топлива.

А.13. Учёт хранения энергии: буферизированный EROI

А.13.1. Методология

$$\text{EROI}_{\text{buffered}} = \text{E}_{\text{generated_delivered}} / (\text{E}_{\text{in,gen}} + \text{E}_{\text{in,storage}} + \text{E}_{\text{in,backup}})$$

где:

- $E_{in,storage}$ – энергозатраты на производство батарей или сооружение ГАЭС
- $E_{in,backup}$ – энергия на резервное топливо (природный газ) для безветренных/пасмурных периодов (только в системах с ограниченным хранением)

A.13.2. Практические рекомендации по оценке хранения

- Для литий-ионных батарей использовать показатель $ESOI_e = 5-15$ (Energy Stored on Energy Invested).
- Для ГАЭС – учитывать энергию на строительство дамбы и насосного оборудования; ГАЭС имеет самый высокий $EROI_i$ среди хранилищ.

A.14. Особенности расчёта национального EROI ($EROI_{nat}$)

Для оценки национальной энергосистемы используется взвешенное среднее:

$$EROI_{nat} = [\Sigma(Q_{i,domestic} \cdot EROI_{i,domestic}) + \Sigma(Q_{j,imported} \cdot EROI_{j,imported})] / (\Sigma Q_{domestic} + \Sigma Q_{imported})$$

Принципы:

- Для внутренней добычи – EROI, специфичный для отрасли региона.
- Для импортируемой энергии – EROI страны-экспортёра, скорректированный на транспортные потери.
- Для трудноизвлекаемых ресурсов применяются пониженные значения.

A.15. Таблицы коэффициентов пересчёта для климатических зон (для PV-систем)

Таблица A.2 – Поправочные коэффициенты для EPBT и EROI солнечных панелей в зависимости от климата (база – Северная Европа)

Климатическая зона	Годовая инсоляция (кВт·ч/м ²)	Коэффициент для EPBT	Климатические особенности
Северная Европа (Германия, Бенилюкс)	950 – 1050	1,00 (база)	Низкая освещённость, облачность
Южная Европа (Испания, Италия)	1500 – 1800	0,60 – 0,70	Высокая инсоляция, перегрев
Ближний Восток (ОАЭ, Оман)	2100 – 2400	0,45 – 0,55	Экстремальная жара
Северная Африка (Сахель)	2200 – 2600	0,40 – 0,50	Пыльные бури

Россия (Москва)	850 – 950	1,10 – 1,20	Снегопады, низкая зимняя освещённость
-----------------	-----------	-------------	---------------------------------------

Пример: В Москве EPBT \approx 4,5 года (вместо 3,7 лет в базовом случае), EROI <4:1 даже без учёта батарей.

А.16. Практические рекомендации и пример расчёта

А.16.1. Унифицированный протокол (3 шага)

1. **Определить границы системы** – минимум «от скважины до колёс» (EROI₃).
2. **Учесть косвенные затраты** – для ветряка: сталь, бетон, редкоземельные магниты; для АЭС: обогащение, остекловывание отходов.
3. **Проверить термодинамический предел** – EROI не может бесконечно расти; для солнечных панелей верхний предел \sim 25:1.

А.16.2. Пример расчёта (комплектная газовая электростанция с учётом хранения)

Исходные данные: СПГ-терминал, газовая турбина, 10-часовое хранилище Li-ion.

1. EROI(СПГ) \approx 12:1.
2. EROI электроснабжения газовой турбиной без хранения = $12 \times 0,55$ (КПД турбины) \approx 6,6:1.
3. Добавляем хранение: Li-ion требует 0,3–0,5 ГДж на производство на 1 ГДж накопленной энергии (ESOI_e \sim 2–3). Потери заряда/разряда по 10% (КПД цикла 80%).
4. Итоговый буферизированный EROI \approx **4,5:1 – 5,5:1**.

А.17. Список литературы (к Приложению А)

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. 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.
3. Malode S., Prakash R., Mohanta J.C. Sustainability assessment of rooftop solar photovoltaic systems: A case study // Environmental Impact Assessment Review. 2024. Vol. 107609.
4. 6W Research. Global Liquid Biofuel Market (2025–2031). 2025.

5. Murphy D.J. The implications of the declining energy return on investment of oil and gas // Nature Energy. 2024 (in press).
6. Carbajales-Dale M., Barnhart C.J., Brandt A.R., Benson S.M. A better currency for investing in a sustainable future // Nature Climate Change. 2014. Vol. 4(7). P. 524–527.
7. Raugei M., Carbajales-Dale M., Barnhart C.J., Fthenakis V. Energy Return on Investment (EROI) of Solar PV. In: A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems. Elsevier, 2012. P. 45–60.
8. Palmer G. Household solar photovoltaics: supplier of marginal abatement, or primary energy? // The ANU – Preprint. 2013.
9. Murphy D.J., Hall C.A.S. Order from Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of Fuels // Sustainability. 2011. Vol. 3(12). P. 2205–2222.
10. Gagnon L., Bélanger C., Uchiyama Y. Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in 2001 // Energy Policy. 2002. Vol. 30(14). P. 1267–1278.
11. König D.H., Freymark G., et al. The EROI of conventional Canadian natural gas production // Sustainability. 2015. Vol. 7(6). P. 7868–7890.
12. Raugei M., Leccisi E. A comprehensive assessment of the energy performance of the first large-scale PV power plant in the Sahara // Progress in Photovoltaics. 2023. Vol. 31(4). P. 354–366.
13. Brandt A.R., Dale M. A general mathematical framework for calculating systems-scale efficiency of energy extraction and conversion: Energy return on investment (EROI) and other energy return ratios // Energies. 2011. Vol. 4(12). P. 2123–2152.
14. Murphy D.J., Hall C.A.S. Energy return on investment (EROI) for the global oil and gas industry // Annals of the New York Academy of Sciences. 2011. Vol. 1219(1). P. 1–13.
15. King C.W. Comparing World Economic and Net Energy Metrics, Part 1: The declining EROI of conventional oil // Energies. 2015. Vol. 8(2). P. 823–847.

Приложение А составлено на основе данных Energy Institute (2025), IEA (2025) и ВИНТИ (2025) по состоянию на май 2026 г. Методика является открытой для внешнего воспроизведения и публичного обсуждения. Версия 1.0.