

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 4 / 2026, Vol. 18, Iss. 4 <https://esj.today/issue-4-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/13NZVN426.pdf>

DOI: 10.15862/13NZVN426 (<https://doi.org/10.15862/13NZVN426>)

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Карташов, М. А. Методика расчета выбросов парниковых газов фотоэлектрическими модулями в процессе демонтажа и утилизации материалов / М. А. Карташов // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 4. — URL: <https://esj.today/PDF/13NZVN426.pdf>. DOI: 10.15862/13NZVN426.

For citation:

Kartashov M.A. A methodology for calculating greenhouse gas emissions of photovoltaic solar modules in the process of decommissioning and material disposal. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(4): 13NZVN426. Available at: <https://esj.today/PDF/13NZVN426.pdf>. DOI: 10.15862/13NZVN426. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 502.174.3

Карташов Михаил Алексеевич

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Инженерно-строительный институт
Высшая школа промышленно-гражданского и энергетического строительства
Аспирант

E-mail: zeouskan@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9110-1779>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1282736

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Mikhail-Kartashov-2>

Методика расчета выбросов парниковых газов фотоэлектрическими модулями в процессе демонтажа и утилизации материалов

Аннотация. Интенсивный рост установленной мощности солнечной энергетики сопровождается увеличением потребления энергоемких материалов и формированием значительного потока отходов фотоэлектрических модулей по завершении их жизненного цикла. Целью исследования является разработка методического подхода к геоэкологической оценке выбросов парниковых газов на заключительном этапе жизненного цикла фотоэлектрических модулей, включающем демонтаж и переработку материалов. В рамках работы предложена структура базы энерго-геоэкологических показателей, дополненная специализированным блоком, учитывающим логистику отходов и технологии утилизации. С использованием ранее полученных данных о материалоемкости модулей различной мощности выполнен укрупненный расчет материальных потоков при годовом вводе солнечных мощностей. Для модуля мощностью 590 Вт определена удельная материалоемкость 53,9 кг/кВт, что позволяет оценивать потребность в стекле, алюминии, кремнии, полимерах и кабельной фракции.

На примере четырех типов фотоэлектрических модулей выполнена детальная оценка, включающая расчет массы отходов, прямых выбросов при транспортировке, захоронении и переработке, а также количественную оценку предотвращенных выбросов при рекуперации вторичного сырья. Установлено, что сценарий глубокой переработки является экологически приоритетным, обеспечивая максимальное сокращение углеродного следа за счет возврата в хозяйственный оборот стекла, алюминия, кремния, других компонентов в процессе переработки модулей.

Полученные результаты могут служить основой для формирования репрезентативной базы данных, необходимой для прогнозирования экологических рисков, оптимизации логистики управления отходами и повышения экологической безопасности при планировании размещения объектов солнечной энергетики.

Ключевые слова: геоэкология; возобновляемые источники энергии; солнечная панель; материалоемкость элементов; парниковые выбросы; методика расчета; оценки

Введение

Цель работы — оценка эмиссии парниковых газов при демонтаже и утилизации фотоэлектрических модулей (ФЭМ) различного типа и установленной мощности. Результаты исследований позволят обосновать экологическую безопасность размещения объектов солнечной энергетики и разработать природоохранные мероприятия по снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Задачи:

- a. Выполнить обзор современного состояния развития солнечной энергетики.
- b. Сформировать структуру базы данных блока 4 «Демонтаж и утилизация», обеспечивающую определение массы образующихся отходов, компонентного состава ФЭМ, массы извлекаемых материалов, остаточной фракции, направляемой на захоронение, величины прямых и предотвращенных выбросов парниковых газов при демонтаже и утилизации фотоэлектрических модулей различных типов.
- c. Провести сравнительный анализ сценариев обращения с отходами при демонтаже и утилизации ФЭМ и сопоставление с исследованиями других авторов по данному этапу жизненного цикла.

Основная часть

Рост спроса на энергию, дефицит качественного топлива, повышение цен на энергоресурсы и экологические проблемы с выбросами загрязняющих веществ стимулируют активное развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Ожидается, что к 2030 году доля ВИЭ в мировой генерации электроэнергии достигнет до 43 % [1]. Одним из перспективных направлений возобновляемой энергетики является масштабное использование фотоэлектрических модулей, достигших в последнее время высоких технико-экономических и экологических показателей.

В 2020 году совокупная мощность солнечных электростанций (СЭС) в мире составила 760 ГВт, в 2023 году превысила 1 ТВт, а к 2030 году прогнозируется ее увеличение до 5 ТВт.¹

В России это направление энергетики характеризуется скромными результатами: на момент 2023 года мощность солнечной энергетики составила 2,15 ГВт (около 0,8 % от суммарной установленной мощности электростанций страны) [2].

Прогнозируемое интенсивное увеличение объемов производимой энергии ФЭМ, потребления энергоемких материально-сырьевых ресурсов и воздействия на окружающую среду требует разработки методических подходов для геоэкологической оценки объектов солнечной энергетики.

¹ Международное энергетическое агентство (IEA). Статистика использования возобновляемых источников энергии в России [Электронный ресурс]. // URL: <https://www.iea.org/countries/russia> (дата обращения: 03.04.2026).

National Renewable Energy Laboratory (NREL). U.S. Life Cycle Inventory (LCI) Database [Электронный ресурс] 2012. URL: <https://www.nrel.gov/analysis/lci/> (дата обращения: 03.04.2026).

В данной работе рассматривается задача формирования показателей выбросов парниковых газов базы данных **блока 4 (демонтаж и утилизация)** после окончания срока эксплуатации ФЭМ.

В первую очередь оценивается материалоемкость и углеродный след ФЭМ HI-MO 7 LR5-72HGD 590M и SilaSolar 900 Вт на основе технологии монокристаллического кремния TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact), характеризующейся повышенной эффективностью, которая занимает более 95 % мирового рынка солнечной энергетики. Дополнительно рассматриваются модули LR4-60HPB-360W и SM 100M-36B, реализованные на основе технологии PERC (Passivated Emitter and Rear Cell), являющейся ранее доминирующей.²

В ранее выполненной работе были определены удельные показатели материалоемкости основных элементов ФЭМ различной мощности: SilaSolar 900 Вт — удельная материалоемкость 0,0422 кг/Вт, HI-MO 7 LR5-72HGD 590M — 0,0539 кг/Вт, LR4-60HPB-360W — 0,0661 кг/Вт, SM 100M-36B — 0,0800 кг/Вт [3]. Полученные данные можно использовать, при определении потребности в материалах в условиях масштабирования развития солнечной энергетики.

На основе работы [3] получена таблица 1 с показателями материалоемкости на 1 кВт мощности.

Таблица 1

Материалоемкость элементов на 1 кВт мощности

Наименование	Наименование элемента	Масса на 1 кВт, кг
Фотоэлектрический модуль HI-MO 7 LR5-72HGD 590M 2278×134×30 мм	Рама алюминиевая	5,55
	Закаленное стекло	39,97
	Слой напыления	0,54
	Кремниевые ячейки	1,34
	Изоляционный слой	5,47
	Блок соединительной и выходной кабель	1,03
Итого:		53,9

Разработано автором

Используя данные таблицы 1 и показатели по годовому вводу солнечных мощностей в мире за 2025 год из International Renewable Energy Agency (IRENA)³ 510,3 ГВт, можно определить массу основных элементов, необходимых для изготовления ФЭМ. По данным Системного оператора Единой энергосистемы (СО ЕЭС) в 2025 году в России дополнительно было введено 0,17 ГВт установленной мощности солнечной энергетики.

Масса *i*-го материала для изготовления ФЭМ определяется по формуле (1):

$$M_{i \text{ материала}} = P_{j \text{ ввод мощности}} \cdot m_i, \quad (1)$$

где:

$M_{i \text{ материала}}$ — масса *i*-го материала, кг;

$P_{j \text{ ввод мощности}}$ — ввод мощности ФЭМ на расчетный год, кВт;

m_i — масса *i*-го материала на 1 кВт, кг/кВт.

² REN21. Global Status Report 2025: Solar PV. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ren21.net/gsr-2025/technologies/solar-pv/> (дата обращения: 03.04.2026).

Trends in Photovoltaic Applications 2024 / IEA PVPS. [Электронный ресурс]. URL: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/10/IEA-PVPS-Task-1-Trends-Report-2024.pdf> (дата обращения: 03.04.2026).

³ International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable capacity highlights 31 March 2026 [Электронный ресурс]. — Abu Dhabi: IRENA, 2026. — 5 p. — URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2026/Mar/IRENA_DAT_RE_capacity_highlights_2026.pdf (дата обращения: 09.05.2026).

Например, масса необходимого алюминия для производства солнечных электростанций суммарной мощностью 510,3 ГВт на базе ФЭМ HI-MO 7 LR5-72HGD 590M составит:

$$M_{i \text{ материала}} = \frac{P_{j \text{ ввод мощности}} \cdot m_i}{1000} = \frac{510,3 \cdot 10^6 \cdot 5,55}{1000} = 2,832 \cdot 10^6 \text{ т} \quad (2)$$

Следует отметить, что мировое производство алюминия в 2025 году составило 73,78 млн т, расчетная потребность алюминия для ФЭМ равна 2,832 млн т, что составляет 3 % от мирового производства. Производство алюминия в РФ за 2025 год составило порядка 3,918 млн т, а расчетная потребность для ввода новых ФЭМ — 944 т.

Аналогично определяется масса других материалов, таблица 2.

Таблица 2

Масса элементов по годовому вводу мощности за 2025 год

Наименование элемента	Масса на 1 кВт, кг	Масса для 510,3 ГВт, т	Масса для 0,17 ГВт, т
Рама алюминиевая	5,55	2 832 597	944
Закаленное стекло	39,97	20 397 296	6 795
Слой напыления	0,54	275 043	92
Кремниевые ячейки	1,34	682 418	227
Изоляционный слой	5,47	2 791 946	930
Блок соединений и выходной кабель	1,03	525 004	175
Итого:	53,9	27 504 305	9 163

Разработано автором

Выбросы парниковых газов от демонтажа ФЭМ являются незначительными по сравнению с другими процессами, но при необходимости могут быть приняты как усредненный показатель 1–3 % от прямых выбросов [3].

Быстрый рост установленной мощности солнечной энергетики обуславливает проблему переработки отработавших ФЭМ. Срок службы модулей оценивается в диапазоне 20–30 лет. Поэтому, в расчетах для укрупненной оценки можно принять срок службы 25 лет в качестве усредненного [4].

В качестве расчетной единицы принимается фотоэлектрический модуль HI-MO 7 LR5-72HGD 590M, для которого известны масса, мощность и компонентный состав, представленный в таблице 3.

Масса отходов принимается равной массе модуля, а распределение отходов по компонентам рассчитывается на основе долей стекла, алюминия, полимерного слоя, кремниевых ячеек, изоляционного слоя, соединительного блока и кабеля.

1. Материалоемкость элементов конкретного принимается по листу технической информации фирмы изготовителя, если таковые представлены. В общем случае, данные по весовым характеристикам ФЭМ принимаются исходя из результатов, представленных в исследованиях, структура такого модуля в процентном соотношении к его массе: Рама алюминиевая — 10,3 %, Закаленное стекло — 74,16 %, Слой напыления — 1 %, Кремниевые ячейки — 2,48 %, Изоляционный слой — 10,15 %, Блок соединений и выходной кабель — 1,91 % [5–7].

В качестве примера был выбран ФЭМ HI-MO 7 LR5-72HGD 590M, габариты: 2278×1134×30 мм, мощностью 590 Вт.⁴

⁴ LONGi Solar Technology Co., Ltd. Technical Documentation: Solar Module model Hi-MO 7 LR5-72HGD 590M [Электронный ресурс]. URL: <https://elck.ru/3Szbfv> (дата обращения: 03.04.2026).

Таблица 3

Материалоемкость элементов ФЭМ

Наименование	Мощность, Вт	Наименование элемента	Масса, кг
Фотоэлектрический модуль HI-MO 7 LR5-72HGD 590M TOPCon 2278×1134×30 мм	590	Рама алюминиевая	3,275
		Закаленное стекло	23,583
		Слой напыления	0,318
		Кремниевые ячейки	0,789
		Изоляционный слой	3,228
		Блок соедин. и выходной кабель	0,607
Итого:			31,8

Разработано автором

На рисунке 1 приведена конструкция ФЭМ.

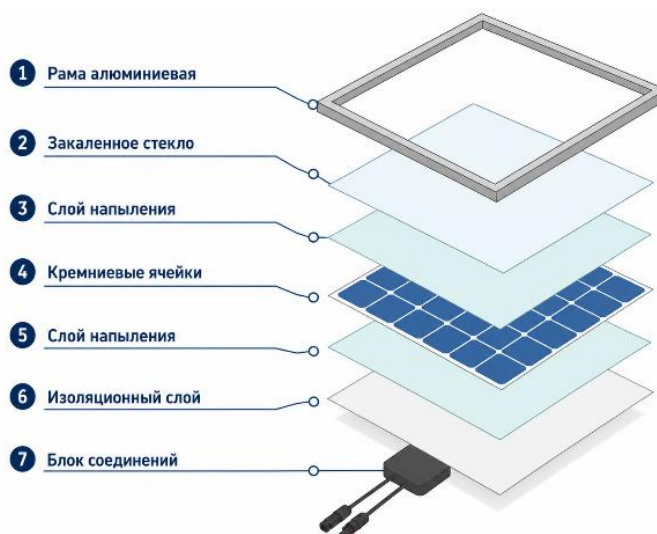


Рисунок 1. Состав элементов ФЭМ (разработан автором)

На стадии демонтажа и утилизации ФЭМ необходимо учитывать не только суммарную массу отходов, но и компонентный состав модуля, поскольку различные материалы имеют неодинаковую степень перерабатываемости и различный потенциал экологического воздействия.

2. Масса отходов ФЭМ определяется по формуле (3):

$$M_{отх} = m_{ФЭМ}, \quad (3)$$

где:

$M_{отх}$ — масса отходов, образующихся после демонтажа одного ФЭМ, кг;

$m_{ФЭМ}$ — масса фотоэлектрического модуля, кг.

Для отдельных компонентов формула (4) [7]:

$$M_i = M_{ФЭМ} \cdot d_i, \quad (4)$$

где:

M_i — масса i-го компонента, кг;

d_i — массовая доля i-го компонента в составе ФЭМ.

При демонтаже одного ФЭМ HI-MO 7 LR5-72HGD 590M образуется 31,8 кг отходов. Наибольшую долю в их составе занимает стекло — 23,583 кг (74,16 %), алюминиевая рама — 3,275 кг и изоляционный слой — 3,228 кг. Кремниевые ячейки занимают меньшую долю по

массе — 0,789 кг, однако именно эта фракция имеет повышенное значение с точки зрения экологической оценки, поскольку содержит потенциально опасные компоненты (кремний, серебро, олово, свинец и другие).

3. Расчет выбросов парниковых газов при утилизации ФЭМ.

Для определения выбросов парниковых газов в процессе утилизации ФЭМ рассмотрим основные способы утилизации:

- захоронение без переработки;
- механическая переработка;
- глубокая переработка с извлечением компонентов ФЭМ.

Предположительно принимается к утилизации 100 т отходов, образованных однотипными ФЭМ с единым принятым компонентным составом. Содержание компонентов составит: стекло — 74,16 т, алюминиевая рама — 10,3 т, изоляционный слой — 10,15 т, напыление — 1 т, кремниевые ячейки — 2,48 т, блок соединений и выходной кабель — 1,91 т. Среднее расстояние до места утилизации равно 50 км. Различия между модулями мощностью 900, 590, 360 и 100 Вт проявляются только при определении количества модулей в партии, ее суммарной мощности и показателей на 1 Вт.

3.1 Захоронение без переработки ФЭМ на специальных полигонах промышленных отходов.

Данный сценарий является наименее предпочтительным с позиции ресурсосбережения и геоэкологических показателей, поскольку приводит к потере значительной массы потенциально перерабатываемых материалов и не соответствует концепции циркулярной экономики. Дополнительным экологическим риском является возможное разрушение модулей при захоронении, что может сопровождаться вымыванием токсичных веществ и смешанных отходов. При данном сценарии масса отходов будет равна массе ФЭМ или удельной материалоемкости [8].

Эмиссия CO₂ от транспортировки модуля ФЭМ до полигона (5) [9]:

$$M_{CO_2 \text{ тр}} = M_{отх} \cdot L \cdot k_{тр}, \quad (5)$$

где:

$M_{CO_2 \text{ тр}}$ — выбросы CO₂ от транспортировки, кг CO₂-экв;

$M_{отх}$ — масса отходов, т;

L — расстояние транспортировки до полигона, км. Принимается равным 50 км;

$k_{тр}$ — коэффициент выбросов грузового транспорта, кг CO₂-экв/т·км. Принимается равным 0,13 для укрупненного расчета [10].

$$M_{CO_2 \text{ тр}} = \frac{100}{1000} \cdot 50 \cdot 0,13 = 650 \text{ кг CO}_2\text{-экв} \quad (6)$$

Эмиссия CO₂ от полигонных операций техники (7):

$$M_{CO_2 \text{ пол}} = M_{отх} \cdot k_{пол}, \quad (7)$$

где:

$M_{CO_2 \text{ пол}}$ — выбросы CO₂ от полигонных операций, кг CO₂-экв;

$M_{отх}$ — масса отходов, т;

$k_{пол}$ — коэффициент выбросов специальной техники при полигонных операциях, кг CO₂-экв/кг отходов. Диапазон 0,01–0,03 кг CO₂-экв/кг отходов для укрупненного расчета [10]. Рассчитывается минимальное и максимальное значения выбросов CO₂ от полигональных операций, с учетом приведенных коэффициентов.

Общая эмиссия CO₂ при захоронении без переработки с учетом транспортировки ФЭМ до полигона и полигонных операций специальной техники (8):

$$M_{CO_2 \text{ общ}} = M_{CO_2 \text{ тр}} + M_{CO_2 \text{ пол}} \quad (8)$$

Полученные результаты для захоронения модуля ФЭМ, мощностью от 100 до 900 Вт (модуль SilaSolar 900 Вт⁵, модуль HI-MO 7 LR5-72HGD 590M⁶, модуль LR4-60HPB-360W⁷ и модуль SM 100M-36B⁸), сведены в таблицу 4. По результатам расчета установлено, что при захоронении без переработки партии отходов ФЭМ массой 100 т прямые выбросы CO₂ составляют 1650–3650 кг CO₂-экв. Поскольку масса партии отходов одинакова для всех рассматриваемых модулей, абсолютные выбросы от транспортировки и полигонных операций совпадают. Следует отметить, что при захоронении отходов будет потеряно значительное количество ценных материалов: стекло, алюминий, кремний, медь и другие. Ориентировочная стоимость материалов, которые могли бы быть возвращены в производственный цикл составляет около 16 млн руб. Стоимость материалов: стекло — 3 руб./кг⁹, алюминий — 155 руб./кг¹⁰, кремний — 450 руб./кг¹¹, медь — 825 руб./кг¹², серебро — 145,7 руб./кг¹³, олово — 2300 руб./кг¹⁴, свинец — 90 руб./кг¹⁵.

Таблица 4

Показатели эмиссии CO₂ ФЭМ при захоронении

Наименование показателя	Мощность ФЭМ, Вт			
	900	590	360	100
Масса партии отходов, т	100			
Эмиссия CO ₂ от трансп. ФЭМ до полиг., кг CO ₂ -экв	650			
Эмиссия CO ₂ от полиг. опер. техн. min, кг CO ₂ -экв	1000			
Эмиссия CO ₂ от полиг. опер. техн. max, кг CO ₂ -экв	3000			
Прямые выбросы CO ₂ min, кг CO ₂ -экв	1650			
Прямые выбросы CO ₂ max, кг CO ₂ -экв	3650			
Удельные выбросы CO ₂ min на 1 т отходов, кг CO ₂ -экв/т отходов	16,5			
Удельные выбросы CO ₂ max на 1 т отходов, кг CO ₂ -экв/т отходов	36,5			

Разработано автором

⁵ SilaSolar 900Вт TOPCon [Электронный ресурс] // Greenlike. — 2026. — URL: <https://clck.ru/3Tagb2> (дата обращения: 03.04.2026).

⁶ LONGi Solar Technology Co., Ltd. Technical Documentation: Solar Module model Hi-MO 7 LR5-72HGD 590M [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3Szbfv> (дата обращения: 03.04.2026).

⁷ LONGi Solar Technology Co., Ltd. Technical Documentation: Solar Module model LR4-60HPB-360W [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3Szc7z> (дата обращения: 03.04.2026).

⁸ Wind-Solar. Technical Documentation: Solar Module model SM-100M-36B [Электронный ресурс]. URL: <https://www.wind-solar.ru/page/Documentation?ysclid=mnqj9p0g79620186399> (дата обращения: 03.04.2026).

⁹ РусРисайкл. Покупка и вывоз стеклобоя в Санкт-Петербурге и Москве [Электронный ресурс]. URL: <https://rus-recycle.ru/steklo> (дата обращения: 17.07.2026).

¹⁰ Пермская металлоломная компания. Прайс закупочных цен цветных металлов с 09.06.2026 [Электронный ресурс]. URL: <https://pmlk.ru/прайс/10-прайс-закупочных-цен-цветных-металлов> (дата обращения: 17.07.2026).

¹¹ Урал Атомизация. Технический кремний [Электронный ресурс]. URL: https://www.ural-atom.ru/goods/90047550-tekhnicheski_kremni (дата обращения: 17.07.2026).

¹² Пермская металлоломная компания. Прайс закупочных цен цветных металлов с 09.06.2026 [Электронный ресурс]. URL: <https://pmlk.ru/прайс/10-прайс-закупочных-цен-цветных-металлов> (дата обращения: 17.07.2026).

¹³ Банк России. Учётные цены на аффинированные драгоценные металлы [Электронный ресурс]. URL: https://www.cbr.ru/hd_base/metall/metall_base_new/ (дата обращения: 17.07.2026).

¹⁴ Интерлом. Приём лома олова: цена за 1 кг [Электронный ресурс]. URL: <https://metallolom-moscow.ru/priem-lom-olova> (дата обращения: 17.07.2026).

¹⁵ Пермская металлоломная компания. Прайс закупочных цен цветных металлов с 09.06.2026 [Электронный ресурс]. URL: <https://pmlk.ru/прайс/10-прайс-закупочных-цен-цветных-металлов> (дата обращения: 17.07.2026).

3.2 Механическая переработка. При данном способе утилизации, ФЭМ проходит предварительную разборку и разделение на компоненты и фракции. Алюминиевая рама, соединительный блок коробки и кабеля, полимерные части модуля разбираются, отделяется стекло, алюминий, медь и смешанная остаточная фракция. В исследованиях указано, что переработка методом измельчения ФЭМ позволяет восстановить в большей части стекло, медь, алюминиевую раму, а кремний, серебро и другие металлы в таком варианте не извлекаются [11].

Для сценария механической переработки в качестве основного укрупненного показателя энергоемкости принят диапазон 130–300 кВт·ч/т (0,130–0,300 кВт·ч/кг) перерабатываемых отходов, приведенный автором для кристаллических кремниевых фотоэлектрических модулей, общий выход переработки около 84 % [7]. Данный показатель был использован для расчета энергозатрат и прямых выбросов CO₂ на стадии переработки.

При механической переработке в качестве основных потенциально извлекаемых фракций принимаются: закаленное стекло — 74,16 т, алюминиевая рама — 10,299 т, блок соединений и выходной кабель — 1,909 т. Кремниевые ячейки и полимерные слои в данном сценарии рассматриваются как часть остаточной фракции. Их полноценное извлечение относится к сценарию углубленной переработки.

Масса потенциально извлекаемых материалов ФЭМ определяется по формуле (9):

$$M_{извл} = M_{стекло} + M_{алюминий} + M_{кабель}, \quad (9)$$

где:

$M_{извл}$ — масса потенциально извлекаемых материалов, т;

$M_{стекло}$ — масса стекла, т;

$M_{алюминий}$ — масса алюминиевой рамы, т;

$M_{кабель}$ — масса кабеля и блока соединений, т;

Масса остаточной фракции определяется как разность между полной массой модуля и массой потенциально извлекаемых материалов (10):

$$M_{ост} = m_{ФЭМ} - M_{извл}, \quad (10)$$

где:

$M_{ост}$ — масса остаточной фракции, т;

$m_{ФЭМ}$ — масса ФЭМ, кг;

Доля потенциально извлекаемых материалов определяется по формуле (11):

$$\eta_{извл} = \frac{M_{извл}}{m_{ФЭМ}} \cdot 100. \quad (11)$$

Доля остаточной фракции (12):

$$\eta_{ост} = 100 - \eta_{извл}. \quad (12)$$

Полученное значение извлеченных материалов равно 86,4 %, что близко к укрупненному показателю общего выхода переработки 84 % для кристаллических кремниевых фотоэлектрических модулей, что подтверждает сопоставимость расчета с опубликованными данными в исследовании [7].

Энергозатраты механической переработки определяются по формуле (13):

$$E_{\text{мех}} = m_{\text{ФЭМ}} \cdot e_{\text{мех}}, \quad (13)$$

где:

$E_{\text{мех}}$ — энергозатраты механической переработки, кВт·ч;

$m_{\text{ФЭМ}}$ — масса ФЭМ, кг;

$e_{\text{мех}}$ — удельная энергоёмкость переработки, кВт·ч/кг.

Минимальное и максимальное значение энергозатрат рассчитано с учетом принятого диапазона 0,13–0,3 кВт·ч/кг.

Прямые выбросы CO₂-экв от механической переработки определяются через энергозатраты процесса (14):

$$M_{\text{CO}_2 \text{ мех}} = E_{\text{мех}} \cdot k_{\text{CO}_2 \text{ эл}}, \quad (14)$$

где:

$M_{\text{CO}_2 \text{ мех}}$ — выбросы CO₂-экв при механической переработке, кг;

$E_{\text{мех}}$ — энергозатраты механической переработки, кВт·ч;

$k_{\text{CO}_2 \text{ эл}}$ — коэффициент выбросов электроэнергии, кг CO₂/кВт·ч.

Коэффициент выбросов электроэнергии принят равным $k_{\text{CO}_2 \text{ эл}} = 0,6$ кг CO₂-экв/кВт·ч. Данное значение рассматривается как консервативное сценарное и соответствует верхней границе опубликованных оценок углеродоемкости электроэнергии для энергосистем с высокой долей ископаемого топлива. По данным из публикаций, средний углеродный след электроэнергии, произведенной и потребленной в России, составляет 310–634 г CO₂-экв/кВт·ч. В связи с этим, значение 0,6 кг CO₂-экв/кВт·ч используется как консервативный коэффициент для расчета выбросов от энергопотребления процессов демонтажа и переработки [12]. Минимальное и максимальное значения прямых выбросов CO₂ экологического баланса рассчитаны с учетом данного коэффициента и равны 7800 и 18 000 кг CO₂-экв.

Алюминий.

Расчет предотвращенных выбросов от элементов осуществляется с использованием данных о производстве первичного алюминия, сопровождается выбросами 15 947 кг CO₂-экв/т, производство вторичного алюминия — 845 кг CO₂-экв/т, разница между первичным и вторичным алюминием составляет 15 102 кг CO₂-экв/т, или 15,102 кг CO₂-экв/кг [13].

Разница коэффициентов выбросов определяется по формуле (15):

$$\Delta k_{\text{алюм}} = k_{\text{алюминий первич}} - k_{\text{алюминий вторич}}, \quad (15)$$

где:

$\Delta k_{\text{алюминий}}$ — предотвращенные выбросы при замещении 1 кг первичного алюминия вторичным, кг CO₂-экв/кг;

$k_{\text{алюминий первич}}$ — коэффициент выбросов первичного алюминия, кг CO₂-экв/кг;

$k_{\text{алюминий вторич}}$ — коэффициент выбросов вторичного алюминия, кг CO₂-экв/кг.

Предотвращенные выбросы CO₂ от возврата алюминиевой рамы (16):

$$M_{\text{CO}_2 \text{ пред алюминий}} = M_{\text{алюминий}} \cdot \Delta k_{\text{алюминий}}, \quad (16)$$

где:

$M_{\text{CO}_2 \text{ пред алюминий}}$ — предотвращенные выбросы за счет возврата алюминия, кг CO₂-экв.;

$M_{\text{пред алюминий}}$ — масса алюминиевой рамы, кг.

Аналогичные расчеты выполняются по другим элементам ФЭМ.

Стекло.

Для оценки предотвращенных выбросов CO₂ от возврата стекольной фракции было принято, что выбросы при производстве стекла для ФЭМ — 0,991 кг CO₂-экв/кг, восстановление целого стекла ФЭМ — 0,245 кг CO₂-экв/кг [14]. Тогда разница (17):

$$\Delta k_{\text{стекло}} = 0,991 - 0,245 = 0,746 \text{ кг CO}_2\text{-экв/кг.} \quad (17)$$

$$M_{\text{CO}_2 \text{ пред стекло}} = 74\,160 \cdot 0,746 = 55\,323,36 \text{ кг CO}_2\text{-экв.} \quad (18)$$

С учетом коэффициента замещения $\alpha_{\text{стекло}}$ равного 0,5 для учета неопределенности качества стекольной фракции (19):

$$M_{\text{CO}_2 \text{ пред стекло}} = 74\,160 \cdot 0,746 \cdot \alpha = 27\,662 \text{ кг CO}_2\text{-экв.} \quad (19)$$

Блок соединений и выходной кабель.

Блок соединений и выходной кабель имеют различные составляющие по материалам (пластик, медь и др.), поэтому введем долю меди $\beta_{\text{медь}}$, равную 0,5.

Тогда, масса меди (20):

$$M_{\text{медь}} = 1909 \cdot 0,5 = 954,5 \text{ кг.} \quad (20)$$

Для меди принимается укрупненная разница между первичной и вторичной медью (21):

$$M_{\text{CO}_2 \text{ пред медь}} = M_{\text{медь}} \cdot \Delta k_{\text{медь}}, \quad (21)$$

где:

$\Delta k_{\text{медь}}$ — предотвращенные выбросы при замещении 1 кг первичной меди вторичной, кг CO₂-экв/кг; принимается по данным из исследования [15], равный 2 кг CO₂-экв/кг.

$$M_{\text{CO}_2 \text{ пред медь}} = 954,5 \cdot 2 = 1909 \text{ кг CO}_2\text{-экв.} \quad (22)$$

Кремниевые ячейки.

Кремниевые ячейки учитываются в материальном балансе как потенциально ценная фракция, однако предотвращенные выбросы от возврата кремния не включаются в основной расчет механической переработки, поскольку полноценное восстановление кремния относится к углубленной переработке. Ниже приведена формула (23) для расчета при углубленной переработке ФЭМ.

$$M_{\text{CO}_2 \text{ пред кремний}} = M_{\text{кремний}} \cdot \Delta k_{\text{кремний}} \cdot \alpha_{\text{кремний}}, \quad (23)$$

где:

$\alpha_{\text{кремний}}$ — коэффициент извлечения кремния при дополнительной обработке;

$\Delta k_{\text{кремний}}$ — разница между первичным и вторичным/восстановленным кремнием.

Полимеры.

Масса полимеров 11,5 т. При базовой механической переработке эти фракции входят в остаток $M_{\text{ост}} = 100 - 86,368 = 13,632$ т.

Итоговый CO₂-баланс будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} M_{\text{CO}_2 \text{ пред общ}} &= M_{\text{CO}_2 \text{ пред алюм}} + M_{\text{CO}_2 \text{ пред стекло}} + M_{\text{CO}_2 \text{ пред медь}} = \\ &= 155\,532 + 27\,662 + 1909 = 185\,103 \text{ кг CO}_2\text{-экв.} \end{aligned} \quad (24)$$

Экологический баланс сценария механической переработки определяется как разность между прямыми выбросами переработки и предотвращенными выбросами от возврата материалов (25):

$$M_{CO_2 \text{ баланс}} = M_{CO_2 \text{ мех}} - M_{CO_2 \text{ пред общ}} \quad (25)$$

где:

$M_{CO_2 \text{ баланс}}$ — итоговый баланс сценария, кг CO₂-экв;

$M_{CO_2 \text{ мех}}$ — прямые выбросы при механической переработке, кг CO₂-экв;

$M_{CO_2 \text{ пред}}$ — предотвращенные выбросы от возврата вторичных материалов, кг CO₂-экв.

Минимальное и максимальное значения итогового экологического баланса равны -177 303 и -167 103 кг CO₂-экв.

Отрицательное значение показывает потенциальный предотвращенный углеродный след, возникающий за счет возврата материалов в производственный цикл и сокращения потребности в первичных материалах.

Полученные результаты для механической переработки партии отходов 100 т ФЭМ, с использованием приведенных формул, сведены в таблицу 5.

Таблица 5

Показатели эмиссии CO₂ ФЭМ при механической переработке на 100 т

Наименование показателя	Мощность ФЭМ, Вт			
	900	590	360	100
Масса партии отходов, т	100			
Извлекаемые материалы, т	86,4			
Остаточная фракция, т	13,6			
Доля извлечения, %	86,4			
Энергия мех. переработки min, кВт·ч	13 000			
Энергия мех. переработки max, кВт·ч	30 000			
Прямые выбросы CO ₂ min, кг CO ₂ -экв	7800			
Прямые выбросы CO ₂ max, кг CO ₂ -экв	18 000			
Предотвращ. выбросы от алюминия, кг CO ₂ -экв	155 532			
Предотвращ. выбросы от стекла, кг CO ₂ -экв	27 662			
Предотвращ. выбросы от меди, кг CO ₂ -экв	1909			
Предотвращ. выбросы общие, кг CO ₂ -экв	185 103			
Экологический баланс min, кг CO ₂ -экв	-177 303			
Экологический баланс max, кг CO ₂ -экв	-167 103			
Удел. эколог. баланс на 1 т min, кг CO ₂ -экв/т отходов	-1773			
Удел. эколог. баланс на 1 т max, кг CO ₂ -экв/т отходов	-1671			

Разработано автором

Прямые выбросы CO₂ составляют 7800–18 000 кг CO₂-экв. За счет возврата алюминия, стекла и меди предотвращенные выбросы составляют около 185 103 кг CO₂-экв.

Итоговый экологический баланс находится в диапазоне от -1773 до -1671 кг CO₂-экв/т отходов.

Поскольку масса партии отходов одинакова для всех рассматриваемых модулей, абсолютные значения энергии, прямых выбросов и предотвращенных выбросов совпадают.

Механическая переработка обеспечивает значимое снижение экологической нагрузки по сравнению с захоронением, однако ее ограничением является отсутствие полноценного извлечения кремния, серебра и других ценных компонентов, которые переходят в остаточную фракцию и требуют более глубокой переработки.

3.3 Глубокая переработка с извлечением компонентов ФЭМ. Глубокая переработка ФЭМ разделяется на два типа: массовую переработку, ориентированную на восстановление высококачественных фракций — стекла, алюминия, меди, и тонкую, направленную на восстановление, как массовых материалов, так и полупроводниковых металлов. Переработка кремния для ФЭМ может осуществляться с энергопотреблением 130–300 кВт·ч/т обработанных отходов при общем выходе переработки около 84 %. Исходные данные для анализа были взяты из таблицы 3.

В исследовании [7] указаны следующие коэффициенты извлечения материалов ФЭМ: стекло — 95 %, алюминий — 100 %, медь — 100 %, кремний — 81 %, серебро — 50 %, олово — 100 %, свинец — 100 %.

Масса извлекаемого материала определяется по формуле (26):

$$M_{\text{мат извл}} = M_{\text{мат}} \cdot \eta_{\text{извл}}, \quad (26)$$

где:

$M_{\text{мат извл}}$ — масса извлекаемого материала, кг;

$M_{\text{мат}}$ — масса материала в составе ФЭМ, кг;

$\eta_{\text{извл}}$ — коэффициент извлечения материала.

Для массы серебра, олова и свинца, входящих в состав ФЭМ, использованы значения из статьи [6]: серебро — 0,170 %, олово — 0,12 %, свинец — 0,06 % от массы модуля. Блок соединений и выходной кабель содержат медь, полимеры и другие компоненты. Для укрупненного расчета была принята доля меди $\beta_{\text{медь}} = 0,5$, массу меди определить по формуле (27):

$$M_{\text{медь}} = M_{\text{кабель}} \cdot \beta_{\text{медь}}. \quad (27)$$

Суммарная масса извлекаемых компонентов при глубокой переработке (28):

$$M_{\text{общ мат извл}} = M_{\text{стекло извл}} + M_{\text{алюминий извл}} + M_{\text{кремний извл}} + M_{\text{медь извл}} + M_{\text{серебро извл}} + M_{\text{олово извл}} + M_{\text{свинец извл}} = 83,98 \text{ т}. \quad (28)$$

Остаточная фракция (29):

$$M_{\text{глуб ост}} = m_{\text{ФЭМ}} - M_{\text{общ мат извл}} = 16,02 \text{ т}. \quad (29)$$

Доля извлекаемых компонентов (30):

$$\eta_{\text{глуб извл}} = \frac{M_{\text{общ мат извл}}}{m_{\text{ФЭМ}}} \cdot 100. \quad (30)$$

Таблица 6

Материальный баланс глубокой переработки ФЭМ

Компонент	Масса, т	Коэф. извл.	Масса извл. компонента, т
Масса ФЭМ	100	—	—
Закаленное стекло	74,16	0,95	70,452
Алюминиевая рама	10,299	1	10,299
Кремниевая фракция	2,481	0,81	2,01
Медь	0,954	1	0,954
Серебро	0,17	0,5	0,085
Олово	0,12	1	0,12
Свинец	0,06	1	0,06
Итого			83,980
Остаточная фракция			16,02

Разработано автором

Полученное значение 84 % соответствует укрупненному выходу глубокой переработки 84 % из статьи [7]. Результаты материального баланса для глубокой переработки 100 т ФЭМ, мощностью 590 Вт, сведены в таблицу 6.

Энергозатраты глубокой переработки определяются по формуле (31):

$$E_{\text{глуб}} = m_{\text{ФЭМ}} \cdot e_{\text{глуб}}, \quad (31)$$

где:

$E_{\text{глуб}}$ — энергозатраты глубокой переработки, кВт·ч;

$m_{\text{ФЭМ}}$ — масса ФЭМ, кг;

$e_{\text{глуб}}$ — удельная энергоёмкость глубокой переработки, кВт·ч/кг. Данный диапазон соответствует 130–300 кВт·ч/т обработанных отходов, приведенным для переработки кремния ФЭМ с восстановлением материалов.

Минимальное и максимальное значения энергозатрат равны 13 000 и 30 000 кВт·ч.

Репрезентативное значение энергозатрат при переработке солнечной ячейки приведенное в работе [7] составляет 185,15 кВт·ч/т, из которых 34 % очистка кремния, 31 % на переработку дробление, химические операции и 26 % на деляминацию полимерного слоя.

$$E_{\text{глуб репр}} = 100 \cdot 185,15 = 18\,515 \text{ кВт·ч}. \quad (32)$$

$$E_{\text{кремний очистка репр}} = 18\,515 \cdot 0,34 = 6295,1 \text{ кВт·ч}. \quad (33)$$

Остальные технологические операции (34):

$$E_{\text{прочее репр}} = 18\,515 - 6295,1 - (18\,515 \cdot 0,31) - (18\,515 \cdot 0,26) = 1666,35 \text{ кВт·ч} \quad (34)$$

Результаты по энергозатратам для глубокой переработки партии отходов 100 т ФЭМ, мощностью 590 Вт, сведены в таблицу 7.

Таблица 7

Энергозатраты при глубокой переработке ФЭМ

Наименование показателя	Значение
Масса ФЭМ, т	100
Удельная энергоёмкость глубокой переработки min, кВт·ч/кг	0,130
Удельная энергоёмкость глубокой переработки max, кВт·ч/кг	0,300
Энергозатраты min, кВт·ч	13 000
Энергозатраты max, кВт·ч	30 000
Репрезентативное значение энергозатрат, кВт·ч	18 515
Очистка кремния (34 %), кВт·ч	6295,1
Переработка солнечных ячеек (31 %), кВт·ч	5739,65
Деляминация полимерного слоя EVA (26 %), кВт·ч	4813,9
Прочие операции, кВт·ч	1666,35

Разработано автором

Прямые выбросы CO₂ от глубокой переработки определяются через энергозатраты процесса (35):

$$M_{\text{CO}_2 \text{ глуб}} = E_{\text{глуб}} \cdot k_{\text{CO}_2 \text{ эл}}, \quad (35)$$

где:

$M_{\text{CO}_2 \text{ глуб}}$ — выбросы CO₂-экв при глубокой переработке, кг;

$E_{\text{глуб}}$ — энергозатраты глубокой переработки, кВт·ч;

$k_{CO_2 \text{ эл}}$ — коэффициент выбросов электроэнергии, кг CO_2 /кВт·ч. Коэффициент выбросов электроэнергии принят равным $k_{CO_2 \text{ эл}} = 0,6$ кг CO_2 -экв/кВт·ч.

$$M_{CO_2 \text{ глуб min}} = 13\,000 \cdot 0,6 = 7800 \text{ кг } CO_2\text{-экв.} \quad (36)$$

Минимальное, максимальное и репрезентативное значения прямых выбросов при глубокой переработке с учетом коэффициента равны 7800; 18 000; 11 109 кг CO_2 -экв.

Алюминий.

Экологический эффект глубокой переработки определяется прямыми выбросами процесса и предотвращенными выбросами за счет возврата вторичных материалов в производственный цикл.

$$M_{CO_2 \text{ пред алюминий}} = \sum M_{i \text{ извл}} \cdot \Delta k_i, \quad (37)$$

где:

$M_{CO_2 \text{ пред алюминий}}$ — предотвращенные выбросы за счет возврата алюминия, кг CO_2 -экв;

$M_{i \text{ извл}}$ — масса извлеченного i -ого материала, кг;

Δk_i — разница между производством первичного и вторичного материала, кг CO_2 -экв/кг;

$$\Delta k_{\text{алюминий}} = 15,947 - 0,845 = 15,102 \text{ кг } CO_2\text{-экв/кг.} \quad (38)$$

$$M_{CO_2 \text{ пред алюминий}} = 10\,298,7 \cdot 15,102 = 155\,531,6 \text{ кг } CO_2\text{-экв/кг.} \quad (39)$$

Аналогичные расчеты выполняются по другим элементам ФЭМ.

Стекло.

Для оценки предотвращенных выбросов от возврата стекольной фракции было принято, что выбросы при производстве стекла для ФЭМ — 0,991 кг CO_2 -экв/кг, восстановление целого стекла ФЭМ — 0,245 кг CO_2 -экв/кг [14]. Тогда разница:

$$\Delta k_{\text{стекло}} = 0,991 - 0,245 = 0,746 \text{ кг } CO_2\text{-экв/кг.} \quad (40)$$

С учетом массы извлеченного стекла предотвращенные выбросы:

$$M_{CO_2 \text{ пред стекло}} = 70\,452 \cdot 0,746 = 52\,557,2 \text{ кг } CO_2\text{-экв.} \quad (41)$$

С учетом коэффициента замещения $\alpha_{\text{стекло}}$ равного 0,5 для учета неопределенности качества стекольной фракции предотвращенные выбросы:

$$M_{CO_2 \text{ пред стекло}} = 70\,452 \cdot 0,746 \cdot \alpha = 26\,278,6 \text{ кг } CO_2\text{-экв.} \quad (42)$$

Медь. Блок соединений и выходной кабель.

Блок соединений и выходной кабель имеют различные составляющие по материалам (пластик, медь и др.), поэтому введем долю меди $\beta_{\text{медь}}$, равную 0,5.

Тогда, масса меди:

$$M_{\text{медь}} = 1,909 \cdot 0,5 = 0,954 \text{ т.} \quad (43)$$

Для меди принимается укрупненная разница между первичной и вторичной медью:

$$M_{CO_2 \text{ пред медь}} = M_{\text{медь}} \cdot \Delta k_{\text{медь}}. \quad (44)$$

где:

$\Delta k_{\text{медь}}$ — предотвращенные выбросы при замещении 1 кг первичной меди вторичной, кг CO₂-экв/кг; принимается по данным из исследования [14], равный 2 кг CO₂-экв/кг. Предотвращенные выбросы от меди 1909 кг CO₂-экв.

Кремний. Кремниевые ячейки.

В качестве укрупненного коэффициента предотвращенных выбросов для кремниевой фракции принято значение 100 кг CO₂-экв/кг [3]. Данный показатель является сценарным, поскольку опубликованные оценки углеродного следа солнечного кремния различаются в зависимости от технологии производства. Так в исследовании [16] для солнечного кремния, полученного металлургическим путем, значение равно 69,77 кг CO₂/кг, а в другом — 10 кг CO₂-экв/кг [17], что показывает сильную зависимость показателя от технологии. С учетом извлеченной массы кремния формула будет иметь вид:

$$M_{\text{CO}_2 \text{ пред кремний}} = M_{\text{кремний}} \cdot \Delta k_{\text{кремний}} \quad (45)$$

где:

$\Delta k_{\text{кремний}}$ — коэффициент энергоемкости кремния.

Предотвращенные выбросы от кремния с учетом извлеченного материала 200 972 кг CO₂-экв.

Серебро. Олово. Свинец.

Углеродный след глобального рыночного набора серебра в базе Ecoinvent составляет 447,93 кг CO₂-экв/кг.¹⁶ В работе [18] за 2025 год по жизненному циклу вторичного извлечения драгоценных металлов показано, что углеродный след вторичного серебра составляет 0,01 т CO₂-экв/кг.

Разница коэффициентов составляет $\Delta k_{\text{серебро}} = 447,93 - 10 = 437,93$ кг CO₂-экв/кг.

Предотвращенные выбросы от серебра с учетом извлеченного материала 37 224,05 кг CO₂-экв.

Для олова использованы данные по первичному и вторичному производству. В статье 2025 года указано для олова 17,1 кг CO₂-экв/кг для первичного производства и 1,61 кг CO₂-экв/кг для вторичного производства [19].

Разница коэффициентов составляет $\Delta k_{\text{олово}} = 17,1 - 1,61 = 15,49$ кг CO₂-экв/кг.

Предотвращенные выбросы от олова с учетом извлеченного материала 1858,8 кг CO₂-экв.

В отчете International Lead Association для первичного производства 1 кг очищенного свинца приведено значение 1,82 кг CO₂-экв/кг.¹⁷ В работе [20] за 2025 год приведены данные, из которых следует, что получение 14,4 т свинцовых слитков связано с выбросами 5355 кг CO₂, что соответствует: 0,372 кг CO₂/кг.

Разница коэффициентов составляет $\Delta k_{\text{свинец}} = 1,82 - 0,372 = 1,448$ кг CO₂-экв/кг.

Предотвращенные выбросы от свинца с учетом извлеченного материала 86,88 кг CO₂-экв.

Полимеры.

¹⁶ Aurubis AG. Life Cycle Assessment of Aurubis Silver and Gold: 2024 Report [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3TSWBf> (дата обращения: 03.04.2026).

¹⁷ International Lead Association. Life Cycle Assessment [Электронный ресурс] // ILA Lead. — URL: <https://ila-lead.org/lifecycle-assessment/> (дата обращения: 03.04.2026).

Масса полимеров 11,15 т или 11,15 % от массы отходов ФЭМ. В исследовании показано, что процесс переработки кремния из панелей включает физические, механические и термические обработки, кислотное выщелачивание и электролиз. Основные воздействия оказывают транспорт, сжигание полимерной части и последующие обработки. Для 1000 кг отходов получено около 370 кг CO₂-экв [21]. Для оценки возможных выбросов при термической обработке полимеров использована формула расчета CO₂ от окисления ископаемого углерода в отходах. При укрупненном значении массовой доли углерода в полимерной фракции 75 %, доле ископаемого углерода, равной 1, и коэффициенте окисления, равного 1, выбросы CO₂ определяются по формуле¹⁸:

$$M_{CO_2 \text{ полимеры}} = M_{\text{полимеры}} \cdot C_{\text{полимеры}} \cdot FCF \cdot OF \cdot \frac{44}{12} \cdot 0,75 \text{ кг CO}_2\text{-экв.} \quad (46)$$

где:

$M_{CO_2 \text{ полимеры}}$ — выбросы CO₂ от термической обработки полимеров, кг CO₂;

$M_{\text{полимеры}}$ — масса полимеров, кг;

$C_{\text{полимеры}}$ — массовая доля углеродов в полимерах;

FCF — доля ископаемого углерода;

OF — коэффициент окисления;

$\frac{44}{12}$ — коэффициент перехода от углерода к CO₂

В основном расчете прямые выбросы глубокой переработки определяются по общей энергоемкости процесса. Дополнительно выполнен расчет, в котором термическое удаление полимерной фракции учитывается отдельно. Такой подход позволяет оценить влияние выбора технологии деламации на итоговый экологический баланс, он исключен из общего итога, так как будет удвоение результатов от полимерных фракций. Результаты по предотвращенным выбросам для глубокой переработки партии отходов 100 т ФЭМ, сведены в таблицу 8.

Таблица 8

Предотвращенные выбросы CO₂ при глубокой переработке 100 т ФЭМ

Материал	Масса извлечения, кг	Коэф. предотвращенных выбросов, кг CO ₂ -экв/кг	Предотвращенные выбросы, кг CO ₂ -экв
Алюминий	10 299	15,102	155 532
Стекло	70 452	0,373	26 279
Кремний	2 010	100,0	200 972
Медь	954	2,0	1 909
Серебро	85	437,93	37 224
Олово	120	15,49	1 859
Свинец	60	1,448	87
Полимеры*	11 151*	2,75*	30 660*
Итого			423 861

*Полимеры не включаются в предотвращенные выбросы, так как они не возвращаются в виде фракции. Значение 30 660 кг CO₂-экв отражает расчет для случая полной термической обработки полимерной фракции. Разработано автором

¹⁸ IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste [Электронный ресурс] / Подготовлено Национальной программой по инвентаризации парниковых газов (NGGIP). — Глава 5: Incineration and Open Burning of Waste. — 2006. — Р. 5.25–5.30. — URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/5_Waste-1.pdf (дата обращения: 03.04.2026).

Итоговый CO₂-баланс будет иметь следующий вид:

$$M_{CO_2 \text{ пред общ}} = M_{CO_2 \text{ пред алюм}} + M_{CO_2 \text{ пред стекло}} + M_{CO_2 \text{ пред кремний}} + M_{CO_2 \text{ пред медь}} + M_{CO_2 \text{ пред серебро}} + M_{CO_2 \text{ пред олово}} + M_{CO_2 \text{ пред свинец}} = 423\,861 \text{ кг CO}_2\text{-экв.} \quad (47)$$

Экологический баланс глубокой переработки:

$$M_{CO_2 \text{ баланс}} = M_{CO_2 \text{ глуб}} - M_{CO_2 \text{ пред}}, \quad (48)$$

где:

$M_{CO_2 \text{ баланс}}$ — итоговый баланс глубокой переработки, кг CO₂-экв;

$M_{CO_2 \text{ глуб}}$ — прямые выбросы при глубокой переработке, кг CO₂-экв;

$M_{CO_2 \text{ пред}}$ — предотвращенные выбросы от возврата вторичных материалов, кг CO₂-экв.

Минимальное и максимальное значения экологического баланса глубокой переработки равно -416 061 и -405 861 кг CO₂-экв

В таблице 9 приведены расчетные данные выбросов углекислого газа для глубокой переработки 100 т отходов ФЭМ однотипных ячеек солнечных модулей различной мощности, наиболее широко применяемых в солнечной энергетике: модуль SilaSolar 900 Вт, HI-MO 7 LR5-72HGD 590M, LR4-60HPB-360W и SM 100M-36B.

Таблица 9

Показатели эмиссии CO₂ ФЭМ при глубокой переработке

Наименование показателя	Мощность ФЭМ, Вт			
	900	590	360	100
Масса партии отходов, т	100			
Извлекаемые материалы, т	84			
Остаточная фракция, т	16			
Доля извлечения, %	84			
Энергия глубокой переработки min, кВт·ч	13 000			
Энергия глубокой переработки max, кВт·ч	30 000			
Репрезентативное значение энергии, кВт·ч	18 515			
Прямые выбросы CO ₂ min, кг CO ₂ -экв	7800			
Прямые выбросы CO ₂ max, кг CO ₂ -экв	18 000			
Репрезентативные прямые выбросы CO ₂ , кг CO ₂ -экв	11 109			
Предотвращ. выбросы от алюминия, кг CO ₂ -экв	155 532			
Предотвращ. выбросы от стекла, кг CO ₂ -экв	26 279			
Предотвращ. выбросы от кремния, кг CO ₂ -экв	200 972			
Предотвращ. выбросы от меди, кг CO ₂ -экв	1909			
Предотвращ. выбросы от серебра, кг CO ₂ -экв	37 224			
Предотвращ. выбросы от олова, кг CO ₂ -экв	1859			
Предотвращ. выбросы от свинца, кг CO ₂ -экв	87			
Предотвращ. выбросы общие, кг CO ₂ -экв	423 861			
Экологический баланс min, кг CO ₂ -экв	-416 061			
Экологический баланс max, кг CO ₂ -экв	-405 861			
Удел. эколог. баланс на 1 т min, кг CO ₂ -экв/т отходов	-4161			
Удел. эколог. баланс на 1 т max, кг CO ₂ -экв/т отходов	-4059			
Доп. выбросы от термич. обраб. полимер., кг CO ₂ -экв	30 660			

Разработано автором

Прямые выбросы CO₂ составляют 7800–18 000 кг CO₂-экв. За счет возврата стекла, алюминия, кремния, меди, серебра, олова и свинца предотвращенные выбросы составляют около 423 861 кг CO₂-экв. Итоговый экологический баланс находится в диапазоне от -4161 до -4059 кг CO₂-экв/т отходов.

В таблице 10 представлены расчетные показатели трех сценариев демонтажа и утилизации материалов ФЭМ, массой 100 т. Для укрупненного расчета принят единый процентный состав отходов, соответствующий модулю HI-MO 7 LR5-72HGD 590M.

Таблица 10

Показатели сценариев демонтажа и утилизации партии отходов ФЭМ

Показатель	Захорон. без перераб.	Механ. перераб.	Глубок. перераб.
Масса отходов, т	100		
Извлекаемые материалы, т	—	86,4	84
Доля извлечения материалов, %	—	86,4	84
Доля остаточной фракции, %	100	13,6	16
Энергозатраты процесса min, кВт·ч	—	13 000	
Энергозатраты процесса max, кВт·ч	—	30 000	
Репрезентативное значение энергии, кВт·ч	—	—	18 515
Прямые выбросы min CO ₂ -экв, кг/ CO ₂ -экв	1650	7800	
Прямые выбросы max CO ₂ -экв, кг/ CO ₂ -экв	3650	18 000	
Предотвращ. выбросы от алюминия, кг CO ₂ -экв	—	155 532	
Предотвращенные выбросы от стекла, кг CO ₂ -экв	—	27 662	26 279
Предотвращенные выбросы от меди, кг CO ₂ -экв	—	1909	
Предотвращенные выбросы от кремния, кг CO ₂ -экв	—	—	200 972
Предотвращенные выбросы от серебра, кг CO ₂ -экв	—	—	37 224
Предотвращенные выбросы от олова, кг CO ₂ -экв	—	—	1859
Предотвращенные выбросы от свинца, кг CO ₂ -экв	—	—	87
Суммарные предотвращенные выбросы, кг CO ₂ -экв	—	185 103	423 861
Экологический баланс min, кг CO ₂ -экв	1650	-177 303	-416 061
Экологический баланс max, кг CO ₂ -экв	3650	-167 103	-405 861
Доп. выброс от термич. обраб. полимеров, кг CO ₂ -экв	—	—	30 660

Разработано автором

Сравнение трех сценариев показывает, что захоронение без переработки характеризуется наименьшими прямыми выбросами, однако не обеспечивает возврат материалов в производственный цикл и является наименее предпочтительным. Механическая переработка требует дополнительных энергозатрат, но за счет возврата компонентов формирует отрицательный экологический баланс. Глубокая переработка обеспечивает наибольший предотвращенный углеродный след, поскольку учитывает извлечение всех компонентов и является наиболее экологически обоснованным сценарием.

Для сопоставления расчетных результатов, полученные для партии отходов ФЭМ массой 100 т, все показатели были дополнительно пересчитаны на 1 т отходов. Прямые выбросы при захоронении составляют 16,5–36,5 кг CO₂-экв/т отходов. Для механической переработки прямые выбросы составляют 78–180 кг CO₂-экв/т отходов, при этом предотвращенные выбросы за счет возврата алюминия, стекла и меди достигают 1851 кг CO₂-экв/т отходов. Для глубокой переработки прямые выбросы приняты в том же диапазоне, однако за счет более полного извлечения материалов предотвращенные выбросы возрастают до 4238 кг CO₂-экв/т отходов. Различия между модулями мощностью 900, 590, 360 и 100 Вт проявляются только при определении количества модулей в партии, ее суммарной мощности и показателей, нормированных на 1 Вт.

Полученные данные сопоставимы с исследованием [21], в котором это значение равно 370 кг CO₂-экв/т. Расчетные результаты ниже, так как в базовом расчете не выделяется отдельная термическая обработка полимеров и химическая переработка, но с ее учетом значение принимает диапазон 384,6 — 486,6 кг CO₂-экв/т.

Предотвращенные выбросы при механической переработке равны 1851 кг CO₂-экв/т, что сопоставимо с исследованием, в котором они указаны в диапазоне от 800–1200 кг CO₂-экв/т.

Предотвращенные выбросы при глубокой переработке 4238 кг CO₂-экв/т, превышают значение 2274 кг CO₂-экв/т, приведенное в литературе. Данное превышение объясняется тем, что автором в расчете дополнительно учтен возврат кремния, стекла, олова и других компонентов.

Итоговый экологический баланс находится в пределах от -1773 до -1671 кг CO₂-экв/т, тогда как в других исследованиях от -800 до -1200 кг CO₂-экв/т. Для глубокой переработки итоговый баланс равен -4161 и -4059 кг CO₂-экв/т, что выше значений -2274 кг CO₂-экв/т из-за более широкого набора извлекаемых компонентов, по сравнению с работами [22–24].

Отличие предлагаемого подхода состоит в том, что расчет выполняется не для усредненного процесса переработки, а для конкретных ФЭМ различной установленной мощности. Это позволяет оценивать массу отходов, компонентный состав, извлекаемые материалы и удельные показатели на 1 Вт мощности. Данный подход может быть использован как прикладное дополнение к существующим LCA-исследованиям и базам данных, поскольку позволяет адаптировать опубликованные коэффициенты к конкретным моделям модулей и сценариям обращения с ними при использовании в России без необходимости использования платных ресурсов и обобщенных данных.

Заключение

1. В работе представлена расчетная структура для дальнейшего формирования базы данных энерго-геоэкологических показателей жизненного цикла фотоэлектрических модулей. В статье основное внимание уделяется формированию блока 4 (демонтаж и утилизация). Предложено в качестве основных показателей при формировании блока 4, использовать значения удельной материалоемкости, энергоемкости, эмиссии загрязняющих веществ на 1 Вт мощности ФЭМ.

2. Рассмотрены три сценария обращения с отходами ФЭМ: захоронение без переработки, механическая переработка и глубокая переработка с извлечением компонентов. При расчетной партии отходов массой 100 т захоронение сопровождается прямыми выбросами 1650–3650 кг CO₂-экв и является наименее предпочтительным, поскольку не обеспечивает возврат материалов в производственный цикл. Механическая переработка позволяет извлечь около 86,4 т материалов и обеспечивает предотвращенные выбросы 185 103 кг CO₂-экв. Итоговый экологический баланс механической переработки составляет от -177 303 до -167 103 кг CO₂-экв. Глубокая переработка обеспечивает извлечение около 84 т компонентов, включая стекло, алюминий, кремний, медь, серебро, олово и свинец. Суммарные предотвращенные выбросы при глубокой переработке составляют 423 861 кг CO₂-экв, а итоговый экологический баланс от -416 061 до -405 861 кг CO₂-экв.

3. Наиболее экологически обоснованным сценарием является глубокая переработка, поскольку она обеспечивает максимальный ресурсный эффект и наибольшее сокращение потенциального углеродного следа за счет замещения первичных материалов вторичными. Полученные расчеты могут быть использованы при формировании базы энерго-геоэкологических показателей жизненного цикла фотоэлектрических модулей.

4. Сравнение полученных результатов с апробированными данными из других источников показывает, что данные находятся в сопоставимом порядке величин с опубликованными LCA оценками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yuehong L., Zafar A., Manuel S., Zhijia H. A Critical Review of Sustainable Energy Policies for the Promotion of Renewable Energy Sources // Sustainability. 2020. Vol. 12, No. 12. Art. 5078. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12125078>.
2. Zhironkin S., Zhironkina O., Gasanov M., et al. The Development of Renewable Energy in Mineral Resource Clusters — The Case of the Siberian Federal District // Energies. 2023. Vol. 16, No. 9. Art. 3843. DOI: 10.3390/en16093843.
3. Карташов М.А. Методика расчета оценки воздействия загрязнения окружающей среды фотоэлектрическими солнечными модулями в процессе производства материалов // Вестник Евразийской науки. 2026. Т. 18, № 2. URL: <https://esj.today/PDF/51NZVN226.pdf> (дата обращения: 13.07.2026).
4. Al Zaabi B., Ghosh A. Managing photovoltaic Waste: Sustainable solutions and global challenges // Solar Energy. 2024. Vol. 283. Art. 112985. DOI: 10.1016/j.solener.2024.112985.
5. Ansanelli G., Fiorentino G., Tammaro M., Zucaro A. A Life Cycle Assessment of a Recovery Process from End-of-Life Photovoltaic Panels // Applied Energy. 2021. Vol. 290. Art. 116727. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116727>.
6. Wahman M., Surowiak A., Ebin B., Berent K. PV back sheet recovery from c-Si modules using hot knife technique // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2024. Vol. 276. Art. 113067. DOI: 10.1016/j.solmat.2024.113067.
7. Mulazzani A., Eleftheriadis P., Leva S. Recycling c-Si PV Modules: A Review, a Proposed Energy Model and a Manufacturing Comparison // Energies. 2022. Vol. 15, No. 22. Art. 8419. DOI: 10.3390/en15228419.
8. Xu C. et al. Future material demand for global silicon-based PV modules under different scenarios // Resources, Conservation and Recycling. 2024. DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107869.
9. Celik I., Lunardi M. M., Frederickson A., Corkish R. Sustainable End of Life Management of Crystalline Silicon Photovoltaic Panels: The Case of Australia // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, No. 16. Art. 5465. DOI: 10.3390/app10165465.
10. du Plessis M.J., Merven B., Oosthuizen J., Goedhals-Gerber L.L. Development of emission intensity factors for a South African freight transport company // South African Journal of Industrial Engineering. 2022. Vol. 33, No. 3. P. 25–37. DOI: 10.7166/33-3-2718.
11. Fan H.-H., Salas-Redondo C., Chalaux A. Life cycle assessment of an innovative high-value-recovery crystalline silicon photovoltaic recycling process — the environmental impacts and benefits // EPJ Photovoltaics. 2024. Vol. 15. Art. 35. DOI: 10.1051/epjpv/2024034.
12. Shirinkina E., Mozzhegorova Y., Ilinykh G., Korotaev V. Carbon Footprint of Electricity Produced in the Russian Federation // Energies. 2025. Vol. 18, No. 1. Art. 14. DOI: 10.3390/en18010014.
13. Peng T., Ren L., Du E., Ou X., Yan X. Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions Analysis of Primary and Recycled Aluminum in China // Processes. 2022. Vol. 10, No. 11. Art. 2299. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10112299>.
14. Chowdhury T., Dehghanimadvar M., Chang N.L., Corkish R. Evaluating short-circularity pathways for photovoltaic glass through life cycle assessment: Cullet recycling versus whole-glass reuse // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2026. Vol. 300. Art. 114227. DOI: 10.1016/j.solmat.2026.114227.

15. Ekman Nilsson A., Macias Aragonés M., Arroyo Torralvo F., Dunon V., Angel H., Komnitsas K., Willquist K. A Review of the Carbon Footprint of Cu and Zn Production from Primary and Secondary Sources // *Minerals*. 2017. Vol. 7, No. 9. Art. 168. DOI: 10.3390/min7090168.
16. Yang S., Yu Z., Ma W. et al. Research on Carbon Emission of Solar Grade Polysilicon Produced by Metallurgical Route Using Digital Simulation Technology // *Silicon*. 2023. Vol. 15, No. 15. P. 6567–6578. DOI: 10.1007/s12633-023-02532-1.
17. de Wild-Scholten M., Gløckner R. Environmental footprint of Elkem Solar Silicon // *Silicon for the Chemical and Solar Industry XI: conference proceedings, Bergen-Ulvik, Norway, June 25–29, 2012.* — 2012. — P. 12–16. DOI: 10.4229/27thEUPVSEC2012-6CV.4.12.
18. Cespi D., Ciacchi L., Chiarini A., Trova E., Acciai C., Ciabatti I., Tirinnanzi M., Passarini F. LCA of precious metals recovery: Modelling the secondary supply of gold, silver, platinum, palladium and rhodium from an integrated refining plant // *Cleaner Energy Systems*. 2025. Vol. 10. Art. 100310. DOI: 10.1016/j.cesys.2025.100310.
19. Sajjad M., van den Boogaart K.G., Steinmeier L., Parvez A.M. Environmental Impact Assessment of Copper-Alloy Production Using Process Simulation and Semantic Modeling // *Advanced Engineering Materials*. 2025. Vol. 27, No. 8. P. 1–13. DOI: 10.1002/adem.202401702.
20. Tseng Y.-L., Ling M.-D., Yuan C.-S., Cheng W.-H. Recycling lead paste from lead-acid batteries through ammonium bicarbonate derived from carbon dioxide in flue gases: A pilot test in an actual factory // *Environmental Technology & Innovation*. 2025. Vol. 40. Art. 104408. DOI: 10.1016/j.eti.2025.104408.
21. Latunussa C.E.L., Ardente F., Blengini G.A., Mancini L. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. Vol. 156. P. 101–111. DOI: 10.1016/j.solmat.2016.03.020.
22. Latunussa C., Mancini L., Blengini G., Ardente F., Pennington D. Analysis of material recovery from silicon photovoltaic panels. — Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. — 41 p. — DOI: 10.2788/786252.
23. Dias P.R., Schmidt L., Chang N.L., Lunardi M.M., Deng R., Trigger B., Gomes L.B., Egan R., Veit H. High yield, low cost, environmentally friendly process to recycle silicon solar panels: Technical, economic and environmental feasibility assessment // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 168. Art. 112900. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112900.
24. Reichel C., Müller A., Friedrich L., Herceg S., Mittag M., Neuhaus D.H. CO₂ emissions of silicon photovoltaic modules — impact of module design and production location // *8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-8), Milan, Italy, 26–30 September 2022: conference proceedings.* — 2022. — P. 1–5.

Kartashov Mikhail Alexeyevich

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
Institute of Civil Engineering
Higher School of Industrial, Civil, and Energy Construction
E-mail: zeouskan@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9110-1779>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1282736

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Mikhail-Kartashov-2>

A methodology for calculating greenhouse gas emissions of photovoltaic solar modules in the process of decommissioning and material disposal

Abstract. The intensive growth in installed capacity of solar energy is accompanied by an increase in the consumption of energy-intensive materials and the formation of a significant waste stream from photovoltaic modules (PV modules) upon the completion of their life cycle. The aim of this study is to develop a methodological approach for the geoecological assessment of greenhouse gas emissions at the final stage of the PV module life cycle, including decommissioning and material recycling. Within the framework of this work, a structure for a database of energy and geoecological indicators is proposed, supplemented with a specialized block that accounts for waste logistics and recycling technologies. Using previously obtained data on the material intensity of modules of different power ratings, an aggregated calculation of material flows has been performed for the annual commissioning of solar capacity. For a 590 W module, the specific material intensity 53,9 kg/kW is determined, which enables the assessment of demand for glass, aluminum, silicon, polymers, and cable fraction.

Using four types of PV modules as examples, a detailed assessment is carried out, including calculation of waste mass, direct emissions from transportation, landfilling and recycling, as well as a quantitative assessment of avoided emissions from the recovery of secondary raw materials. It is established that the deep recycling scenario is environmentally preferable, providing the maximum reduction of the carbon footprint through the return to the economic cycle of glass, aluminum, silicon, and other components recovered during PV module processing.

The obtained results can serve as a basis for forming a representative database necessary for predicting environmental risks, optimizing waste management logistics, and enhancing environmental safety when planning the siting of solar energy facilities.

Keywords: geoecological assessment; renewable energy; photovoltaic modules; material intensity; greenhouse gas emissions; decommissioning and recycling; carbon footprint; waste management