

Оценка экологической эффективности конкурирующих технологий фотовольтаики



С. В. Ратнер,

**д. э. н., доцент, ведущий научный сотрудник,
Институт проблем управления РАН
им. В. А. Трапезникова
lanarat@ipu.ru**



К. А. Закорецкая,

**студент, кафедра аналитической химии,
факультет химии и высоких технологий,
Кубанский государственный университет
zakoretskayarina@mail.ru**

Активное освоение в России новых технологий производства фотоэлектрических модулей и рост производственных мощностей актуализируют проблему оценки и прогнозирования возможных негативных экологических эффектов фотовольтаики на всех стадиях жизненного цикла — производстве, эксплуатации и утилизации. Данное исследование направлено на оценку негативных экологических эффектов фотоэлектрических элементов различных типов по методике анализа и оценки жизненного цикла в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 14040. Для оценки воздействия жизненного цикла фотовольтаики были использованы данные базы EcoInvent по семи наиболее значимым категориям воздействия: окисление, изменение климата, пресноводная экотоксичность, экотоксичность для человека, ионизирующее излучение, землепользование и стратосферное истончение озонового слоя. Собранные данные по разным типам фотоэлектрических систем были обработаны методами описательной статистики по каждой из категорий воздействия на окружающую среду. В результате исследования по каждой категории воздействия были выделены технологии с наименьшим и наибольшим негативным воздействием на окружающую среду.

Ключевые слова: фотовольтаика, солнечные элементы, кремниевые элементы, тонкопленочные элементы, экологические эффекты, база данных EcoInvent, методология оценки жизненного цикла.

Введение

С принятием в мае 2013 г. Постановления Правительства РФ № 499 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности», которое обозначило конкретные схемы поддержки возобновляемой энергетики, в России интенсифицировался процесс строительства и введения в эксплуатацию электростанций, работающих на новых видах источников энергии. Согласно официальным данным ОАО «Администратор торговой системы оптового рынка электроэнергии» в результате конкурсного отбора проектов ВИЭ в течение 2013-2016 гг. было отобрано с целью последующей поддержки всего 79 проектов солнечной генерации общей мощностью 1,185 ГВт, 35 проектов ветровой генерации общей мощностью 801 МВт и 5 проектов малой гидроэнергетики общей мощностью 70 МВт [1]. К настоящему моменту наиболее заметный рост производства наблюдается в секторе фотовольтаики. На 1 июля 2016 г. суммарная мощность солнечных электростанций в стране, подключенных

к единой сети, составила 60,2 МВт. Строительство солнечных электростанций (СЭС) осуществляется в Оренбургской области, Республиках Саха (Якутия), Башкортостан, Хакасия, Алтай. В 2016 г. в Орске была открыта одна из крупнейших в России СЭС мощностью 25 МВт с перспективой расширения до 40 МВт в течение 2017 г.

В течение всего нескольких последних лет для удовлетворения растущего спроса на оборудование для СЭС в стране были запущены совершенно новые производственные мощности. Ярким примером является завод компании «Хевел» по производству тонкопленочных фотоэлементов в Новочебоксарске, запущенный в 2015 г. В апреле 2017 г. действующая производственная линия по производству тонкопленочных фотоэлектрических модулей на заводе была полностью конвертирована под производство улучшенных гетероструктурных солнечных модулей с коэффициентом преобразования энергии выше 20%. Параллельно с развитием новых тонкопленочных технологий, продолжается активное использование на практике (преимущественно в формате микрогенера-

ции и автономной генерации), кремниевых фотоэлектрических элементов и модулей производства таких российских предприятий как ЗАО «Новый солнечный поток», ОАО «НПП «Квант» и др.

Активное освоение новых технологий производства фотоэлектрических модулей и рост объемов производства актуализируют проблему оценки и прогнозирования возможных негативных экологических эффектов фотовольтаики на всех стадиях жизненного цикла — производстве, эксплуатации и утилизации. Несмотря на то, что на стадии эксплуатации солнечные панели всех типов практически не оказывают негативного воздействия на окружающую среду (за исключением возможного нерационального использования почвенных ресурсов), их производство и утилизация связаны со значительным энергопотреблением, использованием рабочих жидкостей, содержащих хлораты и нитриты, образованием сточных вод и т. д. Поэтому исследования, направленные на оценку негативных экологических эффектов солнечной энергетике по методике анализа и оценки жизненного цикла (Life Cycle Analysis) в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 14040 являются актуальными и востребованными практикой.

Целью настоящей работы является анализ жизненного цикла фотоэлектрических панелей наиболее распространенных типов (кремниевых и тонкопленочных), гармонизация первичных данных по наиболее значимым негативным экологическим эффектам исследуемых технологий и их сравнение.

Современный уровень развития производства фотоэлементов

На сегодняшний день на мировом рынке фотовольтаики представлено большое разнообразие фотоэлементов, отличающихся видами исходного сырья и технологиями производства [2]:

- фотоэлементы первого поколения на основе кристаллического кремния (с-Si), как в монокристаллической форме (sc-Si), так и в поликристаллической форме (mc-Si);
- фотоэлементы второго поколения, основанные на тонкопленочной технологии и состоящие из трех главных семейств: аморфного кремния (a-Si),

теллурида кадмия (CdTe) и селенида меди – индия (CIS);

- фотоэлементы третьего поколения на органическом сырье, которые еще не получили большого развития и распространения [3].

Как видно из диаграммы, представленной на рис. 1, популярность фотоэлементов, основой которых служит кремний, с течением времени не снижается, что объясняется широким распространением кремния в земной коре, его относительной дешевизной и достаточно высоким коэффициентом преобразования энергии в сравнении с другими видами солнечных элементов [5]. Поликристаллические элементы (multi-Si), завоевавшие к настоящему времени наибольшую долю рынка, несколько менее производительны чем монокристаллические (mono-Si), однако при этом характеризуются существенно меньшими энергозатратами в процессе производства и, как следствие, низкой стоимостью.

Аморфные кремниевые элементы (a-Si), по технологии производства относятся к тонкопленочным. Для их изготовления на материал подложки тонким слоем наносится силан или кремневодород [6]. У фотоэлементов данного типа коэффициент преобразования энергии даже в лучших лабораторных образцах составляет около 13% (рис. 3), однако имеется и ряд существенных преимуществ: толщина элементов менее 1 мкм, высокая производительность при пасмурной погоде, гибкость.

В фотоэлектрических элементах на основе CIS в качестве полупроводников используются медь, индий и селен, иногда некоторые элементы индия замещают галлием. Элементы на основе теллурида кадмия (CdTe) сегодня считаются одними из самых перспективных и многообещающих элементов в солнечной энергетике, однако их широкое распространение вызывает некоторые опасения по экологическим соображениям в связи с токсичностью кадмия и труднодоступность теллура [2].

Жизненный цикл фотоэлектрических панелей

Жизненный цикл фотовольтаики начинается с добычи сырья и заканчивается утилизацией или переработкой компонентов фотоэлектрических систем и их восстановлением (рис. 4).

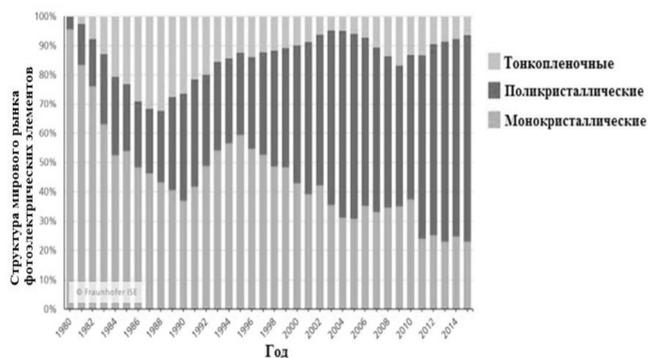


Рис. 1. Структура мирового производства солнечных фотоэлементов в динамике за период 1980-2014 гг. Источник: [4]

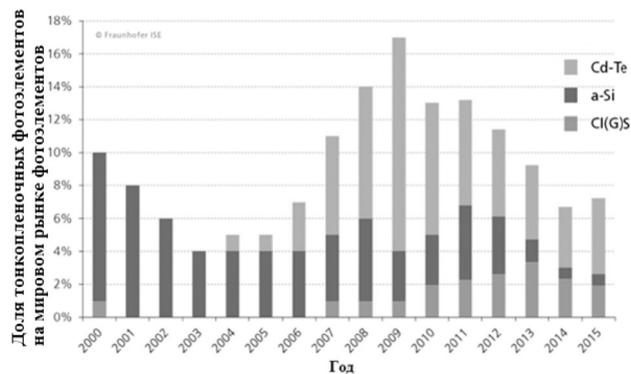


Рис. 2 Структура мирового производства тонкопленочных фотоэлементов в динамике за период 2000-2015 гг. Источник: [4]

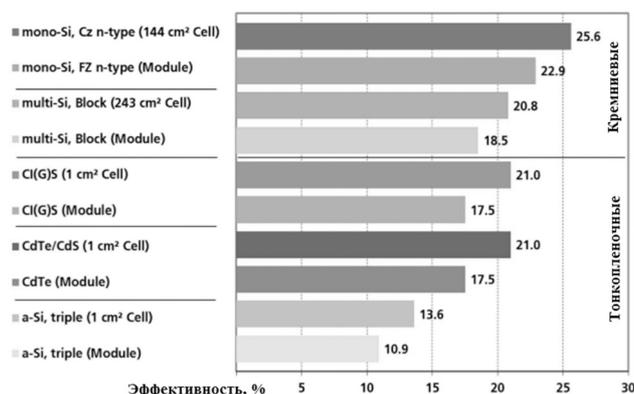


Рис. 3 Коэффициент преобразования энергии у лучших лабораторных образцов различных фотоэлементов
Источник: [4]

Основные негативные эффекты фотовольтаика проявляет на этапе производства и утилизации, и в меньшей степени — на этапе эксплуатации (затемнение и отчуждение земель, загрязнение почвы, воды и воздуха в результате утечки рабочих жидкостей, излучение) [6-10]. Вопрос о негативных воздействиях при утилизации и переработке солнечных панелей пока мало изучен, так как большинство из инсталлированных в последние десятилетия в мире солнечных систем еще находятся в эксплуатации. В настоящее время только 30% всех производителей фотоэлектрических панелей принимают отработанные модуля на переработку.

Методология и информационная база исследования

Для оценки воздействия жизненного цикла фотовольтаики нами были использованы данные базы EcoInvent (некоммерческая ассоциация исследовательских организаций Швейцарии¹). EcoInvent является ведущей в мире базой по оценке жизненного цикла (ОЖЦ) в соответствии со стандартами ISO 14040-14043 и содержит наборы данных по жизненному циклу более чем 12800 продуктов и услуг. При этом база данных не является просто библиотекой отдельных наборов данных ОЖЦ. Данные взаимосвязаны так, что все полуфабрикаты, входные потоки, потребление электричества, спрос на сырье и материалы и потребности в оборудовании зависят от входящих в них подпроцессов производства и поставки полуфабрикатов и услуг по переделам продукции. Результаты ОЖЦ вычисляются в матричной системе, поэтому любое изменение в одном наборе данных процесса будет влиять на накопленные результаты ОЖЦ практически всех других наборов данных.

Оцениваемые негативные экологические эффекты группируются по семи основным категориям воздействия:

¹ В настоящий момент в ассоциацию EcoInvent входят Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Федеральная политехническая школа Лозанны, Институт Пауля Шеррера, Швейцарская федеральная лаборатория материаловедения и технологий, Швейцарский федеральный исследовательский центр в области сельскохозяйственных наук Agroscope (<http://www.ecoinvent.org>).

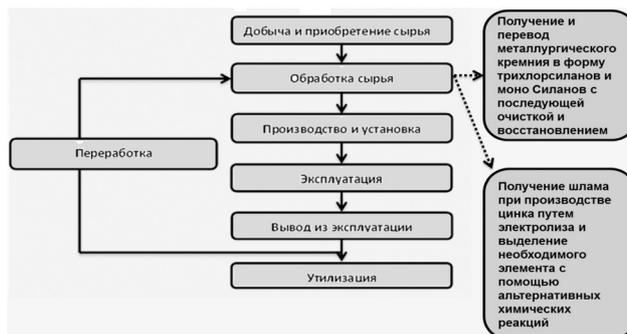


Рис. 4. Жизненный цикл фотоэлектрических систем
Источник: разработка авторов

- 1) окисление (ухудшение минерального состава почвы, повышение потенциально токсичных элементов в грунтовых водах);
- 2) изменение климата (глобальное потепление, повышение уровня моря, исчезновение биологических видов, появление новых болезней);
- 3) пресноводная экотоксичность (загрязнение воды и осадка металлами и сложными органическими соединениями, исчезновение биологических видов);
- 4) токсичность для человека (негативное воздействие на здоровье человека);
- 5) ионизирующее излучение (воздействие радиации на здоровье человека);
- 6) землепользование (вывод их оборота продуктивных земель, сокращение площади лесов, потеря биоразнообразия);
- 7) стратосферное истончение озонового слоя (возникновение раковых заболеваний кожи у человека, сокращение популяций растений).

Более подробное описание категорий воздействия на окружающую среду и единиц измерения соответствующих негативных экологических эффектов приведено в табл. 1.

Оценка воздействия жизненного цикла может проводиться на основе использования нескольких методов – индикаторов, которые отличаются друг от друга шириной охвата категорий воздействия на окружающую среду. В последней версии EcoInvent применяются 16 основных методов. Кратко рассмотрим особенности каждого из них.

Метод «CML 2001» является методом оценки воздействия, который ограничивает количественное моделирование ранними стадиями в причинно-следственной цепи, снижая тем самым неопределенность оценки. Результаты сгруппированы в категориях согласно общим механизмам воздействия на окружающую среду (например, изменение климата) или обычно принимаемые группировки (например, экотоксичность). В основе «CML 2001» лежит эксплуатационный справочник по стандартам ISO, который описывает процедуру проведения ОЖЦ согласно стандартам ISO. Существует две версии данного метода: один с учетом полной эмиссии «CML 2001» (краткосрочная и долгосрочная эмиссия), а другой — с теми же самы-

Категории воздействия на окружающую среду и способы их измерения

Категория	Показатель, единицы измерения	Описание
Окисление	Универсальный потенциал окисления (для всех регионов мира), кг SO ₂ -экв	Увеличение концентрации водородных ионов понижает pH среды и затрагивает биосферу. Основными химическими окислителями является SO ₂ , NO _x , HCl и NH ₃ . Потенциал окисления основан на сумме водородных ионов, произведенных за кг химиката, связанного с SO ₂ . Кислые газы реагируют с водой в атмосфере и тем самым образуется «кислотный дождь». Повышение потенциала окисления наблюдается при сжигании топлива для производства энергии
Стратосферное истончение озонового слоя	Потенциал истончения озонового слоя, кг CFC-11-экв	При сокращении озонового слоя более высокий объем ультрафиолетового облучения проникает к поверхности Земли, что отрицательно влияет на биосферу. Главные факторы истончения озонового слоя – это вещества, содержащие хлор и бром. Все они связаны с представительным веществом для этой категории – трихлорфторметаном (CFC-11). Наибольшее воздействие наблюдается на стадии производства фотоэлементов, а именно очистки кремния и нанесения различных покрытий на элементы
Изменение климата	Потенциал глобального потепления, кг CO ₂ -экв	Выбросы некоторых видов газов (углекислый газ (CO ₂), метан (CH ₄), закись азота (N ₂ O) и фторированные газы) вызывает парниковый эффект, который влечёт за собой изменений климата, опустынивание, повышение уровня моря и распространение болезней. Потенциал глобального потепления – потенциал, определяющий радиационное (разогревающее) воздействие молекулы определенного парникового газа относительно молекулы CO ₂ . Эффект от выброса оценивается за промежуток времени в 20, 100 и 500 лет, наиболее распространенным является оценка в период 100 лет. В качестве эталонного газа взят диоксид углерода
Экотоксичность	Токсичность для человека, пресноводная эко-токсичность воды и осадка, кг 1,4-DCB-экв	Наиболее токсичными веществами являются тяжелые металлы (особенно 6-валентный хром, ртуть, свинец, никель, медь, диоксины, барий и сурьма). Воздействие всех элементов пересчитывается на эквивалент дихлорбензола (1,4-DCB). Дихлорбензол – это органическое соединение, оказывающее губительное действие на здоровье человека, животных и растений
Ионизирующее излучение	Радиация, DALYs	Включает воздействие рентгена, альфа-, бета- и гамма- частиц. Ионизирующее излучение представляется в DALYs (сокращение продолжительности жизни). DALY определяется, как разность прожитых лет и потерянных жизненных лет от эффекта атомной радиации
Землепользование	Площадь занятой земли, м ² /год	Размер и местоположение занятой земли важны, потому что воздействие измеряется в потере биоразнообразия по сравнению с неиспользованной средой. Воздействие от использования земли исчисляется в квадратном метре земли в год

ми характерными факторами, но без учета эмиссии долгосрочной эмиссии «CML 2001 w/o LT»). В данном методе выделяют следующие основные категории воздействия: истощение абиотических ресурсов, влияние землепользования, изменение климата, истощение стратосферного озона, токсичность для человека, экотоксичность (для пресной воды, для морской воды, для наземных биоценозов), образование фотооксидантов, окисление, эвтрофикация. В ОЖЦ могут быть раскрыты и другие неосновные категории воздействия: аварийное воздействие, шумовое воздействие, истощение биотических ресурсов и т. п. [11].

Метод «Cumulative Energy Demand» (в переводе означает «совокупное энергопотребление») количественно оценивает прямое и косвенное потребление

энергии при производстве продукта (или услуги) по всем стадиям жизненного цикла. Основной единицей измерения является показатель общей теплотворной способности. Нормализация данных и весовые коэффициенты не используются. Данный метод широко используется для оценки воздействий на окружающую среду. Результаты CED могут использоваться для сравнения с результатами других подробных исследований ОЖЦ, а также для проверки совершенных ошибок на этапах ЖЦП. В методе также можно различать потребление возобновляемых и невозобновляемых ресурсов [12]. В базе данных EcoInvent CED-индикатор разделен на восемь категорий, представленных в табл. 2.

Метод «Cumulative Exergy Demand» (CExD) в переводе означает «совокупное эксергопотребление».

Таблица 2

Категории метода «Cumulative Energy Demand»

Вид энергоресурса	Категория	Описание
Невозобновляемые ресурсы	Ископаемые	Каменный уголь, лигнит, сырая нефть, природный газ, отходящий газ угольной промышленности, торф
	Ядерное топливо	Уран
	Первичный лес	Древесина и биомасса от девственных лесов
Возобновляемые ресурсы	Биомасса	Древесина, продукты питания, биомасса от сельского хозяйства
	Ветер	Энергия ветра
	Солнце	Солнечная энергия, используемая для тепла и энергии
	Геотермальные источники	Геотермальная энергия
	Вода	Гидроэнергия

Источник: [12]

Эксергией называется максимальное количество энергии, которое можно получить от заданного количества теплоты или вещества, если их параметры привести в равновесие с окружающей средой [13]. Данный метод по набору категорий похож с методом CED, только метод CED показывает, сколько было потреблено энергии, а CExD — сколько можно потребить, чтобы не причинить вреда окружающей среде. В EcoInvent CED-индикаторы разделены на десять категорий, которые помимо восьми категорий, включенных в CED, содержат категории «металлы» и «минералы».

Метод «Eco-Indicator 99» — это один из наиболее часто используемых методов в ОЖЦ. Его преимущество состоит в том, что негативные экологические эффекты выражаются в единых и хорошо сопоставимых единицах измерения, которые легко использовать для проведения сравнительного анализа и выброса той или иной альтернативной технологии производства. Стандартной единицей во всех категориях является «point», равный 1, иногда используют «millipoin», равный 0,1 [11].

Как и в методе «CML 2001», существует две версии алгоритмов расчета: одна с учетом эмиссии, а другой — с теми же самыми характерными факторами, но без учета эмиссии «w/o LT». Этот метод анализирует три различных категории экологического ущерба: ущерб здоровью человека, качеству экосистемы и расход ресурсов. При этом ущерб может быть оценены точки зрения трех различных перспектив исследования:

- (E) — негативные эффекты оцениваются в долгосрочной перспективе, учитываются даже предполагаемые (еще не доказанные) негативные воздействия;
- (H) — негативные эффекты оцениваются в среднесрочной (сбалансированной) перспективе, учитываются только те негативные воздействия, по которым есть консенсус в научной среде;
- (I) — негативные эффекты оцениваются в краткосрочной перспективе, учитываются только доказанные негативные воздействия.

По умолчанию используется перспектива H.

Метод «Ecological Footprint» представляет собой компактную методику, результирующим показателем негативного воздействия производственного процесса в которой является площадь плодородных земель, необходимых для производства природных ресурсов, обеспечивающих поглощение негативных воздействий (компенсирующих ресурсов). Кроме того, в методике применяются показатели использования ядерного топлива и выбросов CO₂. Несмотря на небольшое

количество категорий, данный метод применяется в ОЖЦ довольно часто и эффективно.

Индикатор «Ecological Scarcity» рассчитывается по методу экологического дефицита. Учитываются выбросы загрязняющих веществ в воздух, воду и почву, использование энергетических ресурсов и образование некоторых типов отходов. Все негативные экологические эффекты определяются на основе реально существующих потоков загрязнений и сравниваются с максимально допустимыми негативными эффектами, которые могут быть «переработаны» экосистемой без нарушения ее качества. Существует три версии данного метода: 1997, 2006 и 2013 гг. Версия 2013 г. содержит в себе в два раза больше факторов, чем предыдущие версии, и только она рассматривает долгосрочную эмиссию [12].

Метод «Ecosystem Damage Potential» рассматривает возможность повреждения экосистемы, а именно факторы занятия, преобразования и использования земли. Метод применяется крайне редко.

Метод «EDIP» — это один из часто используемых на практике методов, который учитывает эмиссию загрязняющих веществ, использование ресурсов и влияние производственных условий. Данный метод представлен в двух версиях — с учетом краткосрочной и долгосрочной эмиссии. Существует две версии «EDIP»: 1997 и 2003. «EDIP 1997» содержит две категории — воздействие на окружающую среду и потребление ресурсов, которые в свою очередь подразделяются на факторы. «EDIP 2003» построен на основе «EDIP 1997», но категории разбиты на другие блоки, которые, в свою очередь, подразделяются на характерные факторы: окисление, экотоксичность, эвтрофикация, глобальное потепление, токсичность для человека, землепользование, невозобновляемые ресурсы, возобновляемые ресурсы, фотохимическое формирование озона, стратосферическое истончение озонового слоя.

Индикатор «EPS 2000» (в переводе означает «экологическая приоритетная стратегия») используется при разработке дизайна продукции и является методом составления экобаланса, который описывает воздействие продукта на окружающую среду по следующим категориям: биоразнообразие, производство, здоровье человека, ресурсы и эстетические ценности. Эти воздействия оценены в относительных единицах — «Environmental Load Units» (ELU), которые устанавливаются согласно значениям функции WTP (готовность платить) за элиминирование данного отрицательного эффекта. Один «ELU» равен 1 евро. Как правило, метод используется в пределах отдельных

Таблица 3

Категории метода «ILCD»

Категория	Фактор
Изменение климата	Глобальное потепление
Качество экосистемы	Пресноводное и земное окисление, пресноводная экотоксичность, пресноводная эвтрофикация, ионизирующее излучение, морская эвтрофикация, земная эвтрофикация
Здоровье человека	Канцерогенные эффекты, ионизирующее излучение, неканцерогенные эффекты, истощение озонового слоя, фотохимическое создание озона, дыхательные эффекты, неорганические вещества
Ресурсы	Землепользование, минералы, полезные ископаемые, возобновляемые источники энергии

Источник: [12]

компаний при разработке новой продукции. Возможности применения метода на глобальном уровне ограничены.

Метод «ILCD» представляется собой международную справочную систему данных жизненного цикла. Данный метод использует версию с долгосрочной эмиссией и выделяет четыре категории воздействия: изменение климата, качество экосистемы, здоровье человека, ресурсы. В табл. 3 представлены все факторы по каждой из категорий.

Метод «IMPACT 2002+» был первоначально развит в Швейцарской высшей технической школе специально для сравнительной оценки токсичности для человека и экотоксичности. Метод представлен в двух уровнях: midpoint — средний результат; endpoint — конечный результат.

Метод «IPCC» (метод межправительственной группы экспертов по изменению климата) учитывает только воздействие продукта на изменение климата. Существует три версии «IPCC»: 2001, 2007 и 2013. Две последних версии рассматривают и краткосрочную и долгосрочную эмиссии парниковых газов.

Метод «ReCiPe» объединяет в себе два метода «Eco-Indicator 99» and «CML» и представлен в двух уровнях: midpoint — средний результат; endpoint — конечный результат. «ReCiPe Midpoint» выделяет следующие перспективы исследования (E), (H) и (I), которые по-разному учитывают доказанные и предполагаемые негативные воздействия на качество экосистем, здоровье человека и ресурсы. Оценка воздействий основана на последовательной экологической причинно-следственной цепи, за исключением оценки по категориям землепользования и ресурсов.

Индикатор «Selected LCI results» в переводе означает «отобранные результаты инвентаризационного анализа жизненного цикла». Иными словами, данный метод основан на всех методах в базе данных EcoInvent, т. е. все результаты методов по ОЖЦ по основным категориям (воздух, вода и почва) отбираются, нормируются и представляются в методе «Selected LCI results».

Метод «TRACI» — это инструмент для сокращения и оценки химических и других воздействий на окружающую среду, созданный американским агентством по охране окружающей среды. Данный метод облегчает характеристику экологических стрессоров, имеющих потенциальные негативные эффекты, включая истощение озонового слоя, глобальное потепление, окисление, эутрофикацию, формирование тропосферного озона (смог), экотоксичность, критерии эффектов на здоровье человека и истощение ископаемого топлива [12].

Метод «USEtox» выделяет 4 различных фактора ОЖЦ: один фактор для экотоксичности и три фактора токсичности для человека (представляющий канцерогенное, неканцерогенное и полное воздействие).

Для нашего исследования был выбран метод «CML 2001». Основными факторами выбора именно этого метода были соответствие стандартам ISO серии 14000 «Экологический менеджмент» и достаточно широкий охват различных категорий воздействия на окружающую среду.

Для сравнительной оценки экологических эффектов фотовольтаики, использовались все доступные данные по каждому виду фотовольтаических технологий. Расчет эффектов производился на 1 кВт установленной мощности. В данной работе изучены 17 различных систем фотовольтаики на кремниевых и тонкопленочных элементах: 16 установкам малой мощности (3 кВт) и одной миниэлектростанции мощностью 570 кВт, сданных в эксплуатацию в 2005 г. в Швейцарии на территориях с одинаковым уровнем солнечной инсоляции. Установки различаются не только по типу фотоэлементов (монокристаллический и поликристаллический кремний, ленточный кремний, аморфный кремний и тонкопленочные CdTe и CIS), но и по месту инсталляции (наклонная крыша, плоская крыша, фасад и открытое пространство). Наклонные системы крыши и фасада отличаются также по виду инсталляции (установленный необрамленный ламинат или объединенная обрамленная панель).

Результаты

Результаты ОЖЦ по каждой из категорий воздействия были гармонизированы и обработаны методами описательной статистики. Результаты сравнительного анализа негативных экологических эффектов по основным категориям воздействия приведены на рис. 5-12. Заметим, что в том случае, когда оценка негативного экологического эффекта по той или иной категории имеет отрицательный знак, это значит, что на каком-то одном или нескольких этапах жизненного цикла данный продукт (а нашем случае, фотоэлектрическая установка) не только не наносит ущерба окружающей среде, но и способствуют восстановлению экосистем. На практике такие ситуации, как правило, возникают тогда, когда для производства исследуемого продукта или услуги используются отходы других видов производств, которые было бы необходимо утилизировать в противном случае.

По диаграмме воздействия на окружающую среду по категории «Окисление» (рис. 5) видно, что солнечные батареи оказывают негативного воздействия только в случае наземного размещения (как, например, у миниэлектростанции). При любых других видах инсталляции солнечные батареи, наоборот, способствуют снижению эффектов окисления, наблюдаемых в природной среде за счет негативного воздействия других видов производств.

По категории воздействия «Изменение климата» все виды солнечных систем, за исключением систем на основе теллурида кадмия, наносят ущерб окружающей среде (рис. 6).

По категории воздействия «Пресноводная экотоксичность воды» все виды солнечных систем, наносят ущерб окружающей среде (рис. 7), причем фотоэлектрические системы на основе теллурида кадмия — наибольший, а на основе поликристаллического кремния — наименьший.

По категории воздействия «Пресноводная экотоксичность осадка» наблюдается схожая картина: наибольшее негативное влияние на окружающую среду по данной категории оказывают солнечные системы

Потенциал окисления

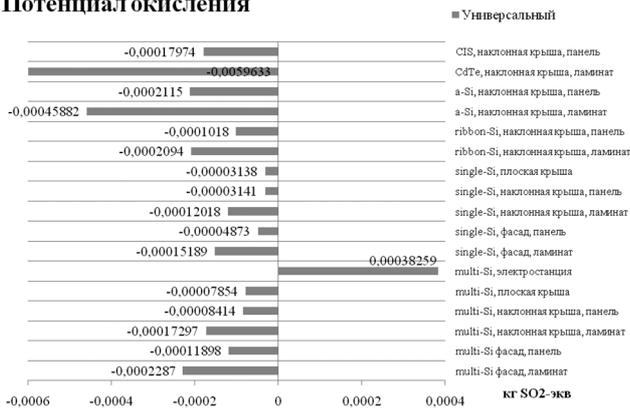


Рис. 5. Диаграмма показателей воздействия на окружающую среду фотоэлектрических установок по категории «Окисление»

Источник: разработано авторами на основе данных [14]

на основе теллурида кадмия, а наименьшее — на основе поликристаллического кремния (рис. 8). В случае наземной установки повышенной мощности (миниэлектростанция) негативное воздействие по данной категории удается свести к минимуму.

По категории воздействия «Токсичность для человека» интенсивность негативного воздействия у всех типов фотоэлектрических элементов колеблется в узком диапазоне и различается не столько в зависимости от вида фотоэлементов, сколько от типа установки солнечной батареи (рис. 9).

По категории «Ионизирующее излучение» различия более заметны. Наибольшие негативные эко-

Пресноводная экотоксичность воды



Рис. 7. Диаграмма показателей воздействия на окружающую среду фотоэлектрических установок по категории «Пресноводная экотоксичность воды»

Источник: разработано авторами на основе данных [14]

Токсичность для человека

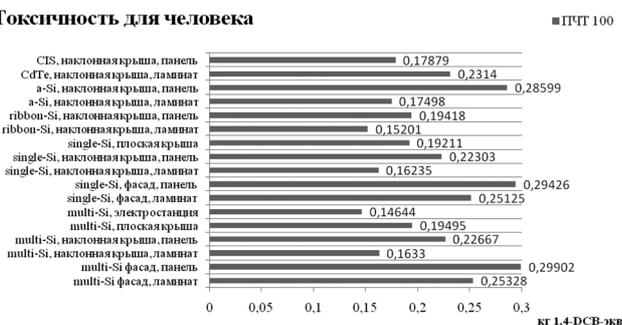


Рис. 9. Диаграмма показателей воздействия на окружающую среду фотоэлектрических установок по категории «Токсичность для человека»

Источник: разработано авторами на основе данных [14]

Изменение климата

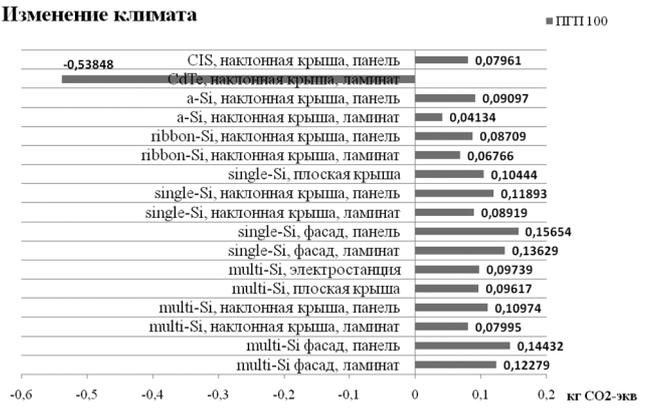


Рис. 6. Диаграмма показателей воздействия на окружающую среду фотоэлектрических установок по категории «Изменение климата».

Источник: разработано авторами на основе данных [14]

логические эффекты по данной категории оказывают солнечные батареи на основе кремния, причем как монокристаллического, так и поликристаллического и аморфного (рис. 10). А вот солнечные установки на основе теллурида кадмия не только не оказывают негативного воздействия по данной категории, но и способствуют элиминированию накопленных ранее негативных эффектов.

По категории воздействия «Землепользование» все солнечные установки, за исключением установок на базе теллурида кадмия, оказывают негативное воздействие (рис. 11). Наибольшее воздействие, как и ожидалось, оказывают наземные установки.

Пресноводная экотоксичность осадка



Рис. 8. Диаграмма показателей воздействия на окружающую среду фотоэлектрических установок по категории «Пресноводная экотоксичность осадка»

Источник: разработано авторами на основе данных [14]

Ионизирующее излучение

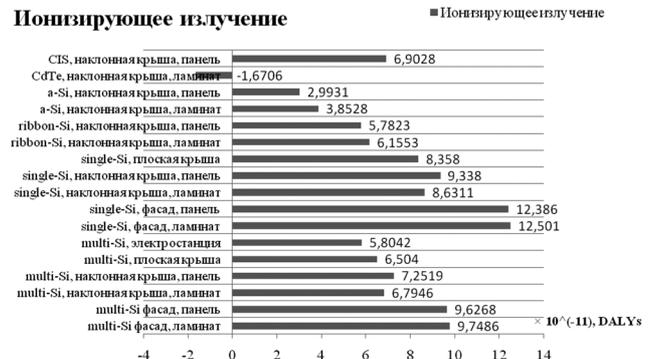


Рис. 10. Диаграмма показателей воздействия на окружающую среду фотоэлектрических установок по категории «Ионизирующее излучение»

Источник: разработано авторами на основе данных [14]

Землепользование

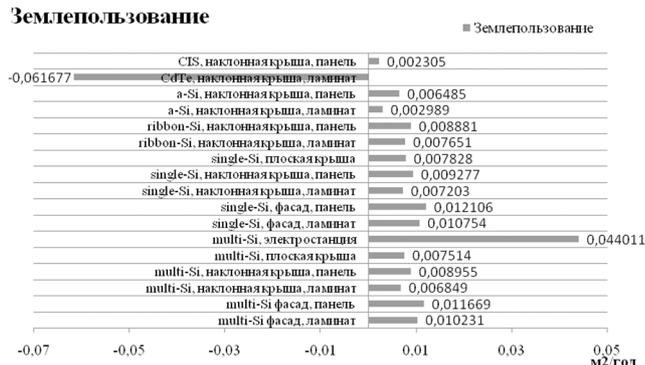


Рис. 11. Диаграмма показателей воздействия на окружающую среду фотоэлектрических установок по категории «Землепользование».

Источник: разработано авторами на основе данных [14]

По категории «Истончение озонового слоя» не оказывают негативного воздействия только солнечные батареи на тонкопленочных элементах на основе CdTe, кремниевые элементы по сравнению с тонкопленочными производят наибольшее негативное воздействие (рис. 12).

Область применения результатов

Полученные оценки негативных экологических эффектов фотовольтаики могут быть использованы для совершенствования региональных систем экологического менеджмента, особенно в тех регионах, где сосредоточены производства фотоэлектрических панелей и добыча сырья для них, а также планируется размещение мощностей для утилизации или переработки солнечных батарей. В результате выполнения работы было установлено, что по сумме всех категорий (при условии их одинаковой значимости) солнечные батареи на тонкопленочных элементах производят в целом меньшие негативные эффекты по сравнению с батареями на кремниевых элементах, а минимальное негативное экологическое воздействие на окружающую среду оказывают солнечные батареи на тонкопленочных элементах на основе теллурида кадмия (CdTe). Однако в силу того, что разные регионы России испытывают различные экологические проблемы, степень важности одного и того же экологического эффекта может быть разной, что необходимо учитывать, как при размещении производственных мощностей, так и при разработке государственных программ поддержки и стимулирования развития солнечной энергетики в России.

Список использованных источников

- С. В. Ратнер, Р. М. Нижегородцев. Анализ опыта реализации проектов в области возобновляемой энергетики в России// Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 1-10.
- Г. Ф. Новиков, М. В. Гапанович/ Солнечные преобразователи третьего поколения на основе Cu-In-Ga-(S, Se)//Успехи физических наук. 2017. № 187 (2). С. 34-41.
- P. Goncalves, M. Gonzalez/ Photovoltaic solar energy: Conceptual framework//Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. № 74. P. 590-601.
- Developments in Renewable Energy – Current Trends and Future Prospects. Power Market. India: Way Forward Kanpur, 2016. <http://www.iitk.ac.in>.
- А. П. Бурман, В. А. Строев. Современная электроэнергетика. Ростов-на-Дону: Росэнергосервис, 2004. С.125-128.

Стратосферное истончение озонового слоя

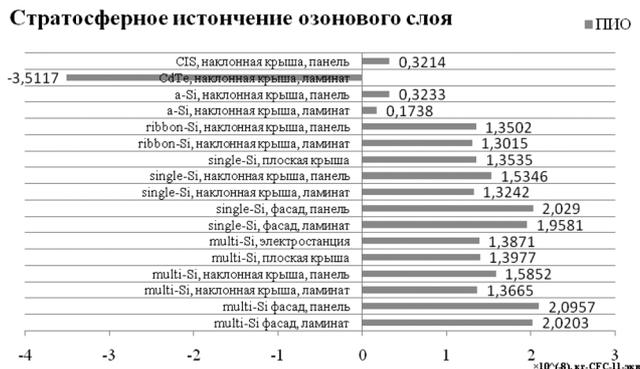


Рис. 12. Диаграмма показателей воздействия на окружающую среду фотоэлектрических установок по категории «Стратосферное истончение озонового слоя»

Источник: разработано авторами на основе данных [14]

- N. Palanov. Analysis of environmental impact from the production of PV system including solar panels produced by Gaia Solar//Life-cycle assessment of Photovoltaic systems. 2014. № 10. P. 100-110.
- L. Serrano-Lujan, N. Espinosa, J. Abad. The greenest decision on photovoltaic system allocation//Renewable Energy. 2017. № 101. P. 1348-1356.
- D. Hengevoss, C. Baumgartner, G. Nisato. Life Cycle Assessment and eco-efficiency of prospective, flexible, tandem organic photovoltaic module//Solar Energy. 2016. № 137. P. 317-327.
- S. Gerbinet, S. Belboom, A. Leonard. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review//Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. № 38. P. 747-753.
- C. Koch, M. Ito. Low-temperature deposition of amorphous silicon solar cells//Solar Energy Materials and Solar Cells. 2001. № 68. P. 227-238.
- P. Aitor, C. Rodriguez. LCIA methods. Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories: version LCIA. Berlin: GreenDelta, 2016. P. 18-21.
- R. Hischier, B. Weidema. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods//Ecoinvent Report, No. 3. St.:Gallen, 2010. P. 100-111.
- Z. Budavari, Z. Szalay. LoRe-LCA. Indicators and weighting systems, including normalisation of environmental profiles//Energy Conversion and Management. 2011. № 20. P. 13-34.
- <http://www.ecoinvent.org>.

Assessment of ecological effectiveness of competing photovoltaic technologies

S. V. Ratner, PhD, associated professor, leading researcher, V. A. Trapeznikov Institute of control science.

K. A. Zakoretskaya, student, department of analytical chemistry, faculty of chemistry and high technologies, Kuban state university.

Active development of new production technologies for photovoltaic modules and growth of production capacities give relevance to the problem of evaluating and forecasting possible negative ecologic effects of photovoltaic technologies on all stages of their lifecycles: production, operation and utilization. This research is meant to evaluate negative ecologic effects of photovoltaic elements of various types using the life cycle analysis methodology in compliance with the requirements of ISO 14040. To evaluate effects from the photovoltaic lifecycle, we use the seven most important categories of the Ecoinvent database: oxidation, climate change, toxicity of fresh water, toxicity for humans, ionizing radiation, use of land and the thinning of the ozone layer of the stratosphere. Data for various types of photovoltaic systems have been processed with descriptive statistical methodologies for each of the aforementioned categories. As a result of researching each category, we identify technologies with highest and lowest negative ecologic effects.

Keywords: photovoltaic, solar elements, silicon elements, thin-film elements, ecological effects, ecoinvent database, methodology of an assessment of life cycle.