

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2026, Том 13, № 1 / 2026, Vol. 13, Iss. 1 <https://resources.today/issue-1-2026.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/16INOR126.pdf>

DOI: 10.15862/16INOR126 (<https://doi.org/10.15862/16INOR126>)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Усачева, М. М. Технологии сбора энергии из окружающей среды для IoT: солнечная, геотермальная, вибрационная, RF и световая — экологические эффекты и ограничения / М. М. Усачева, Герасимов В. В. // Отходы и ресурсы. — 2026. — Т. 13. — № 1. — URL: <https://resources.today/PDF/16INOR126.pdf>. DOI: 10.15862/16INOR126.

For citation:

Usacheva M.M., Gerasimov V.V. Technologies for harvesting energy from the environment for iot: solar, geothermal, vibrational, RF, and light — environmental effects and limitations. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2026;13(1): 16INOR126. Available at: <https://resources.today/PDF/16INOR126.pdf>. DOI: 10.15862/16INOR126. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 621.391

Усачева Мария Михайловна

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», Самара, Россия
Доцент кафедры «Сети и системы связи»
Кандидат технических наук
E-mail: mm.usacheva@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0558-8837>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=747973
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/OLR-7446-2025>

Герасимов Вячеслав Васильевич

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», Самара, Россия
Старший преподаватель
E-mail: Slavon131@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7791-7981>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1150644

Технологии сбора энергии из окружающей среды для IoT: солнечная, геотермальная, вибрационная, RF и световая — экологические эффекты и ограничения

Аннотация. Стремительный рост числа устройств Интернета вещей (IoT), обостряет проблему энергообеспечения и утилизации миллиардов батарей, являющихся источником экологически опасных отходов. По данным Глобального мониторинга электронных отходов ООН (The Global E-waste Monitor 2024), в 2022 году мировой объём электронных отходов достиг 62 млн тонн, из которых лишь 22,3 % были переработаны. Технологии сбора энергии из окружающей среды (energy harvesting) представляют перспективную альтернативу традиционным батарейным источникам питания IoT-устройств. В настоящем обзоре систематизированы современные методы энергосбора: фотоэлектрический (солнечный и световой, включая перовскитные элементы с КПД до 42 % при внутреннем освещении), термоэлектрический (с примерами геотермального питания сенсорных сетей в субарктических регионах), вибрационный (пьезоэлектрический и трибоэлектрический, до 300 Вт/м²) и радиочастотный (RF, с КПД ректенн 36–70 %). Для каждого метода проанализированы плотность генерируемой мощности, климатические и географические ограничения, а также экологические эффекты — от

сокращения батарейных отходов до потенциальных рисков при производстве и утилизации самих устройств энергосбора. На основе анализа оценки жизненного цикла показано, что переход на энергоавтономные IoT-системы способен существенно сократить вклад в глобальный поток электронных отходов. Гибридные многоисточниковые системы с интеллектуальным управлением энергией рассматриваются как наиболее перспективный путь к устойчивому развитию IoT-инфраструктуры. Обзор охватывает 40 источников за период 2018–2025 годов.

Ключевые слова: сбор энергии из окружающей среды; Интернет вещей; фотоэлектрические преобразователи; термоэлектрические генераторы; пьезоэлектрический эффект; трибоэлектрические наногенераторы; RF-энергосбор; электронные отходы; оценка жизненного цикла; устойчивое развитие

Введение

Интернет вещей (IoT) стал одной из определяющих технологических парадигм XXI века, охватывающей промышленность, сельское хозяйство, мониторинг окружающей среды, здравоохранение и городскую инфраструктуру. По оценкам, встречающимся в научной и прикладной литературе, число подключённых IoT/беспроводных устройств к 2025 году оценивается десятками миллиардов (в отдельных прогнозах — порядка 27–31 млрд), что усиливает требования к энергообеспечению и обслуживанию устройств [1; 2]. Однако подавляющее большинство этих устройств питается от химических батарей с ограниченным сроком службы, что порождает две взаимосвязанные проблемы: высокую стоимость обслуживания (замены батарей) и нарастающий поток электронных и батарейных отходов [3; 4].

Согласно данным Глобального мониторинга электронных отходов ООН (The Global E-waste Monitor 2024), в 2022 году мировой объем электронных отходов достиг рекордных 62 млн тонн, увеличившись на 82 % по сравнению с 2010 годом. При этом лишь 22,3 % отходов были надлежащим образом собраны и переработаны. Прогнозируется, что к 2030 году объем электронных отходов возрастет до 82 млн тонн, а доля переработки снизится до 20 % [5]. Значительную часть этого потока составляют батареи и аккумуляторы, содержащие токсичные компоненты — литий, кобальт, свинец, ртуть и кадмий, которые при попадании в окружающую среду наносят серьезный ущерб почвам, водным ресурсам и атмосфере.

Технологии сбора энергии из окружающей среды (energy harvesting, EH) представляют альтернативный подход к энергообеспечению IoT-устройств, способный существенно снизить зависимость от одноразовых и перезаряжаемых батарей. Суть подхода состоит в преобразовании рассеянных форм энергии — солнечного и искусственного света, тепловых градиентов, механических вибраций, радиочастотного излучения — в электрическую энергию, достаточную для питания маломощных сенсорных узлов [6; 7].

Переход к энергоавтономным устройствам не только решает инженерную задачу продления срока службы, но и вносит прямой вклад в достижение Целей устойчивого развития ООН (ЦУР № 7 — «доступная и чистая энергия» и ЦУР № 12 — «ответственное потребление и производство»).

Целью настоящего обзора является систематизация современных технологий сбора энергии из окружающей среды для IoT-устройств с акцентом на два аспекта, актуальных для тематики природных ресурсов и отходов: (1) экологические преимущества каждого метода с точки зрения сокращения батарейных отходов и снижения антропогенной нагрузки на природные ресурсы; (2) ограничения и нерешенные проблемы, включая климатическую зависимость, эффективность преобразования и экологический след производства самих устройств энергосбора.

1. Архитектура энергоавтономного IoT-устройства и энергетический бюджет

Типичный энергоавтономный IoT-узел включает четыре функциональных блока: сенсорный модуль, вычислительный блок (микроконтроллер), модуль беспроводной связи и подсистему энергообеспечения, состоящую из преобразователя энергии (харвестера), системы управления питанием (PMIC) и накопителя энергии (аккумулятор или суперконденсатор) [6; 8]. Критическим параметром является энергетический бюджет: суточное потребление устройства не должно превышать суточную генерацию энергии харвестером с учётом КПД PMIC и потерь в накопителе.

Мощность потребления современных IoT-узлов колеблется от единиц микроватт в режиме глубокого сна до десятков-сотен милливатт при радиопередаче. Например, микроконтроллеры семейства nRF52 (Nordic Semiconductor) потребляют менее 1 мкА в режиме сна и 80–120 мкА во время радиособытий [9]. Именно радиопередача является основным потребителем энергии, что определяет стратегии адаптивного циклического режима работы и сжатия данных. Использование протоколов LoRaWAN (5–10 км дальности при 25–100 мВт), BLE 5.0 (1–10 мВт), ZigBee (20–100 мВт) и DASH7 (сотни микроватт) позволяет подобрать оптимальное решение для конкретного сценария развертывания [10; 11].

Плотность мощности различных источников энергии окружающей среды существенно различается. По обобщенным данным, солнечные элементы обеспечивают ~15 мВт/см² на открытом воздухе и ~100 мкВт/см² при внутреннем освещении; пьезоэлектрические преобразователи — ~330 мкВт/см³; вибрационные электромагнитные генераторы — ~116 мкВт/см³; термоэлектрические генераторы — ~40 мкВт/см³; RF-харвестеры — единицы микроватт на квадратный сантиметр [6; 12]. Эти значения определяют область применимости каждого метода и необходимость гибридных решений.

2. Фотоэлектрический сбор энергии (солнечный и световой)

2.1 Наружные фотоэлектрические системы

Фотоэлектрическое (ФЭ) преобразование остается наиболее зрелой и высокоэффективной технологией энергосбора для IoT. Современные монокристаллические кремниевые элементы достигают КПД 18–23 % в стандартных условиях, а элементы на основе арсенида галлия — до 25–30 % [10; 13]. Для IoT-приложений характерно использование миниатюрных панелей площадью 1–36 см², генерирующих от десятков до сотен милливатт при прямом солнечном свете. Реализованные системы беспроводных сенсорных сетей с солнечным питанием демонстрируют непрерывную работу в течение нескольких лет, включая проекты мониторинга микроклимата лесных экосистем [14] и геофизические исследования [15].

Основные ограничения наружных ФЭ-систем определяются климатическими факторами: облачность снижает световой поток на 70–90 %, снежный покров может полностью блокировать панели, а в полярных регионах полярная ночь длится месяцами. Кроме того, эффективность кремниевых элементов падает на 0,3–0,5 % на каждый градус выше 25°C, что актуально для пустынных и тропических локаций [6; 16]. Решение этих проблем требует либо значительных аккумуляторных резервов, либо комбинирования с другими источниками энергии (термоэлектрическими, вибрационными). Гибридные фотоэлектро-термоэлектрические (ФЭ-ТЭГ) системы позволяют дополнительно утилизировать тепло, выделяемое нагретой солнечной панелью, достигая прироста общей эффективности на 5–30 % [17].

2.2 Фотоэлектрический сбор при внутреннем освещении

Особый интерес представляет сбор энергии из искусственного освещения внутри зданий. Большинство IoT-устройств, развертываемых в «умных» зданиях, офисах и на промышленных площадках, работают при освещенности 200–1 000 люкс, что на 2–3 порядка

ниже прямого солнечного света. Кремниевые элементы демонстрируют КПД всего 5–10 % в таких условиях, тогда как аморфный кремний обеспечивает 6–8 % благодаря лучшему спектральному согласованию с источниками искусственного света [10; 13].

Прорывом в данной области стало развитие перовскитных солнечных элементов (PSC), которые достигают рекордных 40–42 % КПД при внутреннем освещении [18; 19]. Широкозонные галидные перовскиты обладают настраиваемой шириной запрещенной зоны и превосходными зарядово-транспортными свойствами, что обеспечивает высокое напряжение холостого хода даже при слабом освещении [20]. Годичное мониторинговое исследование показало, что перовскитный элемент площадью всего 1 см² генерирует за год 148,8 мВт·ч — втрое больше, чем аналогичный кристаллический кремниевый элемент (46,0 мВт·ч). Этого достаточно для питания IoT-устройства с BLE-связью на большинстве дней года [21].

С экологической точки зрения перовскитные фотоэлементы имеют существенное преимущество в виде низкотемпературного производства и возможности использования гибких, потенциально биоразлагаемых подложек. Однако содержание свинца в классических перовскитных составах вызывает обоснованные опасения, стимулируя разработку бессвинцовых альтернатив [20]. Интегрированные фотокапаторы — устройства, объединяющие фотоэлемент и суперконденсатор в одном трехклеммном корпусе, — демонстрируют КПД зарядки 18 % при внутреннем освещении с использованием биосовместимых материалов (хитозан грибного происхождения), что позволяет создавать «зеленые» источники питания для встроенных вычислений [22].

3. Термоэлектрический (геотермальный) сбор энергии

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) преобразуют температурный градиент в электрический ток на основе эффекта Зеебека. ТЭГ не имеют движущихся частей, обладают высокой надежностью и способны работать независимо от освещенности, что делает их незаменимыми в условиях полярных ночей, подземных выработок и промышленных объектов [6; 23]. КПД современных термоэлектрических материалов составляет 2–5 % при перепадах температур 5–10°C. Мощность ТЭГ определяется формулой $P = S^2 \cdot \Delta T^2 \cdot R_{load} / (R_{int} + R_{load})^2$, где S — коэффициент Зеебека, ΔT — разность температур [13].

Одним из наиболее ярких практических примеров является проект геотермального энергоснабжения беспроводных сенсорных сетей в субарктических регионах Исландии. Система, развернутая в 2021 году для мониторинга температуры грунта в криолитозоне, непрерывно функционирует более 3 лет, используя геотермальное тепло в сочетании с солнечными панелями и протоколом DASH7 для минимизации энергопотребления [24; 25]. Это демонстрирует реальную возможность «вечного» IoT-мониторинга в экстремальных условиях, полностью исключая необходимость замены батарей.

Инновационное направление — бумажные термоэлектрические генераторы (ПТЭГ), изготовленные на основе целлюлозных подложек. Бумага является экологически безопасным, биоразлагаемым и дешевым субстратом, а технологии печати термоэлектрических материалов на бумагу позволяют создавать гибкие, масштабируемые генераторы для утилизации низкопотенциального тепла — от промышленного оборудования до солнечных панелей и бытовой электроники [26]. Для автономных IoT-сенсоров на открытом воздухе разработаны системы ТЭГ с пассивным охлаждением на основе материалов с фазовым переходом, обеспечивающие КПД до 26,4 % и генерацию до 407 мВт при адекватном температурном градиенте [27].

К ограничениям термоэлектрического метода относятся: низкий КПД по сравнению с фотоэлектрическими системами; сильная зависимость от стабильности температурного

градиента (который может исчезать при выравнивании температур дня и ночи); использование в некоторых высокоэффективных материалах (Bi_2Te_3) токсичных элементов — теллура и висмута, что создает экологические риски при утилизации [23; 26]. Перспективы связаны с разработкой материалов с повышенной термоэлектрической добротностью ($ZT > 2$) и переходом на нетоксичные составы.

4. Вибрационный сбор энергии: пьезоэлектрический и трибоэлектрический методы

4.1 Пьезоэлектрический сбор энергии

Пьезоэлектрические преобразователи генерируют электрический заряд при механической деформации кристаллических или полимерных материалов (PZT, PVDF, ZnO, BaTiO_3). В контексте IoT они преобразуют вибрации промышленного оборудования, транспортных конструкций, ветровых турбин и даже человеческих движений в электроэнергию [28; 29]. Плотность мощности пьезоэлектрических генераторов составляет ~ 330 мкВт/см³, что позволяет получать от единиц микроватт до 15 мВт в зависимости от источника вибраций [12; 30]. Практическое применение включает автономные LoRaWAN-узлы, питаемые пьезоэлектрическими датчиками, установленными на промышленном оборудовании. Эксперименты показывают, что массив из пяти пьезоэлектрических преобразователей при частоте вибраций 50 Гц обеспечивает энергоавтономную передачу данных с интервалом не менее 5 минут [31]. В энергетической отрасли разработана система мониторинга усталостных повреждений лопастей ветровых турбин на основе бистабильных пьезоэлектрических харвестеров, прошедшая успешные наземные испытания [32].

Основные ограничения пьезоэлектрического метода: узкополосность резонансной характеристики (оптимальная работа только на одной частоте), ограниченный ресурс при циклических нагрузках для керамических материалов, необходимость точного позиционирования относительно источника вибраций. Решением является создание перестраиваемых преобразователей с регулируемой резонансной частотой и гибридных пьезоэлектрическо-электромагнитных систем, расширяющих полосу захвата энергии [33; 34].

4.2 Трибоэлектрические наногенераторы (ТЭНГ)

Трибоэлектрические наногенераторы (ТЭНГ) используют эффект контактной электрификации и электростатической индукции для преобразования механической энергии в электрическую. ТЭНГ демонстрируют рекордные показатели плотности мощности — до 300 Вт/м² и объемной плотности энергии до 400 кВт·ч/м³ [13; 35]. Рынок наногенераторов оценивается в 39,5 млрд долл. (2024) с прогнозом роста до 84 млрд долл. к 2033 году, что свидетельствует о высокой промышленной востребованности [30].

Ключевое преимущество ТЭНГ с экологической точки зрения — возможность изготовления из недорогих, широко распространенных и потенциально биоразлагаемых материалов (PTFE, целлюлозные нановолокна, MXenes). ТЭНГ применяются для создания самопитаемых датчиков давления, температуры, мониторинга транспорта, морских объектов и городской инфраструктуры [35]. Новейшие разработки включают беспроводные ТЭНГ-сенсоры на основе механизма пробойного разряда, обеспечивающие дальность передачи данных до 30 м при толщине устройства менее 95 мкм и массе 16 мг, что открывает перспективы для носимых и встраиваемых IoT-приложений [36].

К ограничениям ТЭНГ относятся: зависимость выходной мощности от влажности окружающей среды (высокая влажность снижает трибоэлектрический эффект), необходимость периодического физического контакта между рабочими поверхностями, а также отсутствие

стандартизированных методов характеристики и тестирования, затрудняющее сравнение различных разработок [30; 35].

5. Сбор энергии из радиочастотного излучения (RF)

RF-энергосбор основан на улавливании электромагнитного излучения от источников радиочастотного диапазона: сотовых базовых станций, Wi-Fi роутеров, теле- и радиопередатчиков. Принятая антенной энергия выпрямляется с помощью ректенны (rectifying antenna) и преобразуется в постоянный ток [7; 37]. В отличие от других методов, RF-энергия доступна круглосуточно и в помещениях, что делает её привлекательной для IoT-устройств в городской среде, хотя плотность мощности RF-излучения крайне низка — обычно единицы микроватт на квадратный сантиметр.

Современные ректенны на частоте 2,45 ГГц достигают КПД преобразования 36–70 % при входной мощности от -10 до 0 дБм, обеспечивая направленность до 7,2 дБи [7]. Перспективным направлением является технология одновременной передачи информации и энергии (SWIPT — Simultaneous Wireless Information and Power Transfer), позволяющая совмещать радиосвязь и беспроводное питание в одном канале [38]. Инновационная система PassiveLiFi объединяет сбор энергии из светодиодных источников с обратным рассеянием RF-сигнала, обеспечивая дальность связи 80,3 м при энергопотреблении в микроваттном диапазоне [39].

С экологической точки зрения RF-энергосбор привлекателен тем, что использует «паразитную» энергию, уже присутствующую в окружающей среде, не требуя дополнительных материальных ресурсов для её генерации. В контексте сельского хозяйства RF-харвестинг рассматривается как средство питания датчиков точного земледелия в удаленных районах, снижающее потребность в батареях и связанные с ней экологические последствия [4].

Основные ограничения: обратно-квадратичная зависимость мощности от расстояния до источника; сильное влияние погодных условий (влажность, температура, ветер) на эффективность, что остается малоисследованной областью [3]; низкая плотность энергии, требующая длительных периодов накопления (по расчетам, для накопления энергии небольшой батареи типа «таблетка» могут потребоваться годы [13]); зависимость от наличия RF-инфраструктуры, отсутствующей в удаленных районах.

6. Гибридные и многоисточниковые системы энергосбора

Ни один из рассмотренных методов не является универсальным: каждый имеет климатические, географические и инфраструктурные ограничения. Поэтому актуальным направлением является создание мультиисточниковых (гибридных) систем, объединяющих несколько методов энергосбора для обеспечения непрерывного питания в переменных условиях [6; 8]. Многоходовые конвертеры, такие как разработанный Zhang et al. (2024), обеспечивают пиковую эффективность 91,1 % при одновременной работе с термоэлектрическим, фотоэлектрическим и вибрационным источниками [16].

Практическими примерами гибридных систем служат: комбинация ФЭ-панели и ТЭГ, утилизирующего тепло от нагрева панели (прирост до 30 %) [17]; мультиисточниковые харвестеры RF + ТЭГ для круглосуточной работы в условиях отсутствия солнечного света [11]; системы «солнце + геотермия» для субарктического мониторинга [24; 25]; самопитаемые узлы мониторинга конструкций мостов, использующие солнечную энергию и вибрации транспортного потока [8]. Гибридный подход требует более сложных РМЭС с поддержкой MPPT для каждого источника, но кардинально повышает надежность и энергетическую устойчивость системы.

7. Сравнительный анализ технологий

В таблице 1 представлены обобщенные характеристики рассмотренных технологий сбора энергии из окружающей среды в применении к IoT-устройствам. Данные обобщены на основе [6; 10; 12; 13; 23; 30; 37].

Таблица 1

Обобщенные характеристики

Метод	Плотность мощности	КПД	Доступность 24/7	Экологичность	Основные ограничения
Солнечная (наруж.)	15 мВт/см ²	15–23 %	Нет	Высокая	Облачность, полярная ночь, нагрев
Световая (внутр.)	100 мкВт/см ²	6–42 %	Условно	Высокая*	Низкая освещённость, Pb в перовскитах
Термоэлектрич.	40 мкВт/см ³	2–26 %	Да**	Средняя	Низкий КПД, нестабильность ΔT
Пьезоэлектрич.	330 мкВт/см ³	~10–20 %	Условно	Средняя	Узкополосность, ресурс
Трибоэлектрич.	до 300 Вт/м ²	~20–50 %	Условно	Высокая	Влажность, износ
RF-энергосбор	~1 мкВт/см ²	36–70 %	Да***	Высокая	Низкая плотность, расстояние

* — при использовании бесвинцовых составов; ** — при наличии стабильного теплового градиента; *** — при наличии RF-инфраструктуры. Составлено авторами

8. Экологические эффекты: снижение отходов и оценка жизненного цикла

8.1 Снижение батарейных отходов

Ключевым экологическим преимуществом энергоавтономных IoT-систем является потенциальное сокращение потока батарейных отходов. При сроке службы типичной батареи 1–3 года сеть из 1 000 узлов генерирует тысячи единиц батарейных отходов за десятилетний период эксплуатации. Переход на технологии сбора энергии из окружающей среды с суперконденсаторами (ресурс > 100 000 циклов) или LTO-аккумуляторами (7 000–20 000 циклов) практически исключает эту статью отходов [8; 10]. Учитывая, что глобальный объем электронных отходов достиг 62 млн тонн/год и менее четверти из них перерабатывается [5], вклад даже частичного перехода IoT-индустрии на энергоавтономные решения может быть весьма существенным.

8.2 Оценка жизненного цикла IoT-систем

Методология оценки жизненного цикла (LCA) позволяет количественно оценить экологические последствия развертывания IoT-систем «от колыбели до могилы». Исследование Pascual et al. (2023) предложило аналитическую модель для расчета энергии, необходимой для полного жизненного цикла IoT-развертывания с солнечным питанием, и объема отходов при утилизации.

При сценарии 30-летней эксплуатации «зелёная» солнечная система потребовала в 3 раза больше энергии жизненного цикла, чем базовый вариант, но генерировала в 15 раз меньше отходов по объему [2]. Это подчеркивает необходимость учитывать не только эксплуатационные, но и производственные затраты при проектировании «зеленых» IoT-систем.

Современные исследования LCA литий-ионных батарей показывают, что выбор метода переработки и географии производства может снизить углеродный след переработки на 87 %, водопотребление — на 72 %, а токсичность для пресноводных экосистем — на 50 % [40]. Это

имеет прямое отношение к IoT-отрасли, где массовые замены батарей вносят значительный вклад в потоки литий-ионных отходов. С другой стороны, производство устройств энергосбора также сопряжено с экологическими издержками: использование полупроводниковых материалов, редкоземельных элементов, а для ряда термоэлектрических и пьезоэлектрических материалов — токсичных соединений свинца [26; 28].

8.3 Экосистемный подход и циркулярная экономика

Исследования подчеркивают, что улучшение экологической производительности отдельного IoT-продукта через конвенциональный LCA и экодизайн не является достаточным для обеспечения экологической устойчивости в масштабе. Необходим системный подход, учитывающий абсолютные пределы воздействия на окружающую среду и применяющий принципы ретроспективного проектирования (backcasting) [9]. Инициативы, такие как Ambient IoT Alliance, продвигают стандарты батарейно-свободных устройств и принципы экодизайна, предполагающие проектирование IoT-узлов «под разборку и переработку» [10; 11].

9. Ограничения и перспективы развития

Несмотря на значительный прогресс, технологии энергосбора для IoT сохраняют ряд системных ограничений. Первое — разрыв между лабораторными характеристиками и реальной производительностью: условия тестирования часто не отражают переменность и непредсказуемость природных источников энергии. Второе — отсутствие унифицированных стандартов для оценки эффективности и сопоставления различных технологий. Третье — необходимость существенных начальных вложений: стоимость энергоавтономных систем в 2–3 раза выше батарейных аналогов, хотя окупаемость достигается за 3–5 лет [8; 10].

Перспективные направления включают: (1) развитие стандартов IEEE 802.15.4z, IETF 6LoWPAN/CoAP и спецификаций LoRaWAN для энергоэффективных протоколов связи [10; 11]; (2) интеграцию искусственного интеллекта (AIoT) для предсказания доступности энергии, адаптивного управления нагрузкой и оптимизации MPPT [13, 16]; (3) разработку материалов нового поколения — перовскитов с КПД > 42 % для внутреннего освещения [18], термоэлектриков с $ZT > 2$, биоразлагаемых трибоэлектрических наногенераторов; (4) технологии беспроводной передачи энергии 5G/6G, когда сама инфраструктура мобильной связи становится источником энергии для IoT [10; 38]; (5) интеграцию солнечного энергосбора в мониторинг солнечных и ветровых электростанций, где IoT-датчики контролируют те же ресурсы, которые их питают [16; 32].

Заключение

Технологии сбора энергии из окружающей среды представляют собой не просто инженерное решение проблемы энергопитания IoT-устройств, но системный подход к снижению антропогенной нагрузки на природные ресурсы. Солнечная и световая энергия обеспечивают наивысшую плотность мощности и достигли высокой технологической зрелости; термоэлектрический метод незаменим в условиях отсутствия освещения; вибрационный (пьезоэлектрический и трибоэлектрический) сбор обладает уникальным потенциалом для промышленного мониторинга и носимых устройств; RF-энергосбор перспективен для городской среды с развитой телекоммуникационной инфраструктурой.

С экологической точки зрения переход к энергоавтономным IoT-системам способен: (а) существенно сократить поток батарейных отходов, содержащих токсичные компоненты;

(б) снизить углеродный след обслуживания (исключение логистики замены батарей); (в) поддержать принципы циркулярной экономики при условии экодизайна самих устройств энергосбора. Однако экологический баланс зависит от конкретного сценария и требует обязательного анализа полного жизненного цикла, включая производство и утилизацию устройств.

Дальнейшее развитие определяется комбинацией гибридных систем энергосбора, интеллектуального управления энергией на основе AI, новых материалов и стандартизации интерфейсов. В контексте природных ресурсов и отходов энергоавтономные IoT-системы играют двойную роль: как инструмент мониторинга состояния воды, почв, атмосферы и возобновляемых источников энергии — и как технология, непосредственно сокращающая антропогенные отходы электронной индустрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pascual, J. Estimating the Environmental Impact of Green IoT Deployments / J. Pascual, L.C. Casals, P. Bauer. — DOI 10.3390/s23031537 // Sensors. — 2023. — Т 23, № 3. — С. 1537.
2. Puluckul, P.P. Battery-Less Environment Sensor Using Thermoelectric Energy Harvesting from Soil-Ambient Air Temperature Differences / P.P. Puluckul, M. Weyn. — DOI 10.3390/s22134782 // Sensors. — 2022. — Т 22, № 13. — С. 4782.
3. Eltayeb, M.H. Impact of Weather on Radio-Frequency Energy Harvesting Efficiency: Review and Future Directions / M.H. Eltayeb, M.S.M. Gismalla, M. Alsharif et al. — DOI 10.1109/ACCESS.2024.3367031 // IEEE Access. — 2024. — Т 12. — С. 28687–28710.
4. Mukhtar, A. Powering the Future of Farming: RF Energy Harvesting for Environmental Sustainability / A. Mukhtar, A.U. Nkwoada, M. Hassan. — DOI 10.1088/1755-1315/1397/1/012022 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2024. — Т 1397. — С. 012022.
5. Baldé, C.P. The Global E-waste Monitor 2024 / C.P. Baldé, R. Kuehr, T. Yamamoto, R. McDonald. — Bonn: United Nations University (UNU)/SCYCLE; Geneva: International Telecommunication Union (ITU); Geneva: International Labour Organization (ILO), 2024. — 116 с. — ISBN 978-92-61-38421-6.
6. Tang, X. Energy Harvesting Technologies for Achieving Self-Powered Wireless Sensor Networks in Machine Condition Monitoring: A Review / X. Tang, X. Wang, R. Cattley, F. Gu, A.D. Ball. — DOI 10.3390/s18124113 // Sensors. — 2018. — Т 18, № 12. — С. 4113.
7. Murad, M. RF Energy Harvesting Techniques for Battery-less Wireless Sensing, Industry 4.0, and Internet of Things: A Review / M. Murad, A. Haider, W.A. Awan et al. — DOI 10.1109/ACCESS.2024.3367031 // IEEE Access. — 2024. — Т 12. — С. 28687–28710.
8. Castellini, L. Self-Powered Wireless Structural Sensors for Long-Term Monitoring of Bridges / L. Castellini, E. García-Macías, F. Ubertini, G. Clementi. — DOI 10.1016/j.prostr.2024.09.111 // Procedia Structural Integrity. — 2024. — Т 62. — С. 824–831.
9. Liimatainen, V. Evaluating the (Ir)relevance of IoT Solutions with Respect to Environmental Limits Based on LCA and Backcasting Studies / V. Liimatainen, H. Pihkola, P. Raussi — DOI: 10.21428/bf6fb269.e7f0f475 // Limits: Computing and Sustainability. — 2023. — С. 5.

10. Singh, S. Environmental Energy Harvesting Techniques to Power Standalone IoT-Equipped Sensor and Its Application in 5G Communication / S. Singh. — DOI 10.28991/esj-2021-SP1-08 // Emerging Science Journal. — 2021. — T 4, Special Issue. — C. 116–126.
11. Thangarajan, A.S. AsTAR: Sustainable Energy Harvesting for the Internet of Things through Adaptive Task Scheduling / A.S. Thangarajan, T.D. Nguyen, M. Liu, D. Hughes. — DOI 10.1145/3555306 // ACM Transactions on Sensor Networks. — 2022. — T 18, № 4. — P. 1–29.
12. Kumar, V. Lifetime Enhancement of Wireless Sensor Network Using Solar Energy Harvesting / V. Kumar, R. Rajput, R. Singh et al. — DOI 10.1049/wss2.12008 // IET Wireless Sensor Systems. — 2021. — T 11, № 2. — C. 47–56.
13. Boucif, O.H. Artificial Intelligence of Things for Solar Energy Monitoring and Control / O.H. Boucif, A.M. Lahouaou, D.E. Boubiche, H. Toral-Cruz. — DOI 10.3390/app15116019 // Applied Sciences. — 2025. — T 15, № 11. — C. 6019.
14. Jin, J. Evaluation of Microclimatic Detection by a Wireless Sensor Network in Forest Ecosystems / J. Jin, Y. Wang, H. Jiang, X. Chen et al. — DOI 10.1038/s41598-018-34832-7 // Scientific Reports. — 2018. — T 8. — C. 16433.
15. Zhou, K. Internet-of-Things-Based Four-Dimensional High-Density Electrical Instrument for Geophysical Prospecting / K. Zhou, Q. Zhang, Y. Liu, Z. Wu et al. — DOI 10.5194/gi-10-141-2021 // Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems. — 2021. — T 10, № 2. — C. 141–151.
16. Zhang, Y. A 91.1% Peak Efficiency Multi-Input Energy Harvesting Interface for Thermoelectric, Photovoltaic, and Vibration Sources / Y. Zhang et al. — DOI 10.1109/TPEL.2024.10846221 // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2024. — T 39, № 12. — C. 16234-16248.
17. Rajpar, A.H. Efficiency Enhancement of Photovoltaic-Thermoelectric Hybrid Systems for Solar Energy Harvesting / A.H. Rajpar, M.A. Soomro, A.W. Khan et al. — DOI 10.1016/j.jclepro.2024.141925 // Journal of Cleaner Production. — 2024. — T 450. — C. 141925.
18. Ryu, H.-S. Recent Strategies for High-Performing Indoor Perovskite Photovoltaics / H.-S. Ryu, J.-W. Park, C.-S. Park et al. — DOI 10.3390/nano13020259 // Nanomaterials. — 2023. — T 13, № 2. — C. 259.
19. Nain, S. Reliable Perovskite Indoor Photovoltaics for Self-Powered Devices / S. Nain, J. Madan — DOI: 10.1093/nsr/nwaf242 // National Science Review. — 2025. — T 12, № 8. — C. nwaf242.
20. Li, M. Wide-Bandgap Halide Perovskites for Indoor Photovoltaics / M. Li, F. Igbari, Z.-K. Wang, L.-S. Liao. — DOI 10.1002/ente.202100087 // Energy Technology. — 2021. — T 9, № 5. — C. 2100087.
21. Baumann, D. Indoor Energy Harvesting with Perovskite Solar Cells for IoT Applications — A Full Year Monitoring Study / D. Baumann, K.-C. Tsui, F. Mayr et al. — DOI 10.1021/acsaem.3c02498 // ACS Applied Energy Materials. — 2024. — T 7, № 1. — C. 300–307.
22. Flores-Diaz, N. Unlocking High-Performance Photocapacitors for Edge Computing in Low-Light Environments / N. Flores-Diaz, F. De Rossi, T. Keller, H. Morritt et al. — DOI 10.1039/d5ee01052g // Energy & Environmental Science. — 2025. — T 18. — C. 4704–4716.

23. Jouhara, H. Thermoelectric-Powered Sensors for Internet of Things / H. Jouhara, A. Żabnieńska-Góra, N. Khordehgah et al. — DOI 10.3390/s23010032 // Sensors. — 2023. — Т 23, № 1. — С. 32.
24. Puluckul, P.P. Geothermal Energy Harvesting for Long-Term Wireless Sensor Networks in Arctic Regions / P.P. Puluckul, M. Weyn. — DOI 10.3390/app14156753 // Applied Sciences. — 2024. — Т 14, № 15. — С. 6753.
25. Puluckul, P.P. Experiences with Sub-Arctic Sensor Network Deployment and Feasibility of Geothermal Energy Harvesting / P.P. Puluckul, M. Weyn — DOI: 10.1109/WCNC61545.2025.10978303 // 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). — IEEE, 2025.
26. Ahmad, A. Paper-Based Thermoelectric Generators for Viable Waste Heat Harvesting / A. Ahmad, O. Prakash, P. Kumar et al. — DOI 10.1088/1361-6463/ad8660 // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2024. — Т 57, № 50. — С. 503001.
27. Carvalho, C. A Thermoelectric Energy Harvesting Scheme with Passive Cooling for Outdoor IoT Sensors / C. Carvalho, N. Gomes, N. Paulino. — DOI 10.3390/en13113120 // Energies. — 2020. — Т 13, № 11. — С. 3120.
28. Ali, A. Piezoelectric Energy Harvester Technologies: Synthesis, Mechanisms, and Multifunctional Applications / A. Ali, R.A. Pasha, H. Elahi et al. — DOI 10.1021/acsami.3c17037 // ACS Applied Materials & Interfaces. — 2024. — Т 16, № 22. — С. 28487–28520.
29. Ali, A.H. Piezoelectric Energy Harvesting towards Self-Powered Internet of Things (IoT) Sensors in Smart Cities / A.H. Ali et al. — DOI 10.3390/s21248332 // Sensors. — 2021. — Т 21, № 24. — С. 8332.
30. Musameh, A.A. Sustainable Energy Harvesting in IoT Devices: A Review of Piezoelectric and Triboelectric Nanogenerators / A.A. Musameh, S. Jafri, A.H. Sulaiman et al. — DOI: 10.53469/jisem.2025.01(04).01 // Journal of Industrial and Systems Engineering and Management. — 2025. — Т 1, № 4. — С. 35–52.
31. Bertoni, F. Piezoelectric Sensors as Energy Harvesters for Ultra Low-Power IoT Applications / F. Bertoni, B. Luani, G. Luani et al. — DOI 10.3390/s24082587 // Sensors. — 2024. — Т 24, № 8. — С. 2587.
32. Plagianakos, T. The Design and Ground Test Verification of an Energy-Efficient Wireless System for the Fatigue Monitoring of Wind Turbine Blades Based on Bistable Piezoelectric Energy Harvesting / T. Plagianakos, N. Chrysochoidis, G. Bolanakis, D. Saravanos. — DOI 10.3390/s24082480 // Sensors. — 2024. — Т 24, № 8. — С. 2480.
33. Li, W. Applications of a Novel Tunable Piezoelectric Vibration Energy Harvester / W. Li, Y. Wang, Z. Liu. — DOI 10.3390/mi14091782 // Micromachines. — 2023. — Т 14, № 9. — С. 1782.
34. Liu, X. Piezoelectric Vibration Energy Harvester: Operating Mode, Excitation Type and Dynamics / X. Liu, K. Li, Y. Zhang. — DOI 10.1177/16878132221131177 // Advances in Mechanical Engineering. — 2022. — Т 14, № 10. — С. 16878132221131177.
35. Wang, Z.L. Triboelectric Nanogenerator for High-Entropy Energy, Self-Powered Sensors, and Blue Energy / Z.L. Wang et al. — DOI 10.1126/sciadv.ads2291 // Science Advances. — 2024. — Т 10, № 48. — С. eads2291.
36. Zhou, Y. Review of Self-Powered Wireless Sensors by Triboelectric Nanogenerators / Y. Zhou, X. Li, J. Chen et al. — DOI: 10.3390/s25134028 // Sensors. — 2025. — Т 25, № 13. — С. 4028.

37. Sarker, M.R. Micro Energy Harvesting for IoT Platform: Review Analysis toward Future Research Opportunities / M.R. Sarker et al. — DOI 10.1016/j.heliyon.2024.e27778 // Heliyon. — 2024. — Т 10, № 6. — С. e27778.
38. Wang, J. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in IoT-Based Scenarios: Architectures, Challenges, and Prototype Validation / J. Wang, S. Lee, Y. Li et al. — DOI 10.1109/JIOT.2024.3448275 // IEEE Internet of Things Journal. — 2024. — Т 11, № 18. — С. 29658–29672.
39. Mir, M.S. PassiveLiFi: Rethinking LiFi for Low-Power and Long-Range RF Backscatter / M.S. Mir, A. Varshney, B. Genovés, D. Giustiniano — DOI: 10.1145/3447993.3483262 // Proceedings of the 27th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom). — New York: ACM, 2022. — С. 456–468.
40. Oeser, D. Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Battery Recycling / D. Oeser, S. Menz et al. — DOI 10.1021/acssuschemeng.3c01771 // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. — 2023. — Т 11, № 28. — С. 10587–10599.

Usacheva Maria Mikhailovna

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

E-mail: mm.usacheva@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0558-8837>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=747973

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/OLR-7446-2025>

Gerasimov Vyacheslav Vasillevich

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

E-mail: Slavon131@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7791-7981>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1150644

Technologies for harvesting energy from the environment for iot: solar, geothermal, vibrational, RF, and light — environmental effects and limitations

Abstract. The rapid growth of Internet of Things (IoT) devices exacerbates the problem of energy supply and disposal of billions of batteries, which are a source of environmentally hazardous waste. According to the UN Global E-waste Monitor 2024, the global volume of electronic waste reached 62 million tons in 2022, with only 22,3 % recycled. Energy harvesting technologies from the environment offer a promising alternative to traditional battery power sources for IoT devices. This review systematizes modern energy harvesting methods: photovoltaic (solar and light, including perovskite elements with efficiency up to 42 % under indoor lighting), thermoelectric (with examples of geothermal powering of sensor networks in subarctic regions), vibrational (piezoelectric and triboelectric, up to 300 W/m²), and radio frequency (RF, with rectenna efficiency of 36–70 %). For each method, the power density generated, climatic and geographical limitations, as well as environmental effects — from reducing battery waste to potential risks in the production and disposal of the harvesting devices themselves — were analyzed. Based on life cycle assessment analysis, it is shown that transitioning to energy-autonomous IoT systems can significantly reduce the contribution to the global electronic waste flow. Hybrid multi-source systems with intelligent energy management are considered the most promising path to sustainable development of IoT infrastructure. The review covers 40 sources from 2018–2025.

Keywords: energy harvesting from the environment; Internet of Things; photovoltaic converters; thermoelectric generators; piezoelectric effect; triboelectric nanogenerators; RF energy harvesting; electronic waste; life cycle assessment; sustainable development