

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ /
GENERAL ISSUES

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2024. Т. 27, № 2. С. 175—193.

DOI: 10.17073/1609-3577j.met202406.597

УДК 621.335:338.620.9

Энергия, спрос на вычислительную мощность и «зеленый» мир

© 2024 г. Н. А. Соболев✉

*Университет Авейру, Департамент физики и i3N,
3810–193 Авейру, Португалия*

✉ Автор для переписки: niksob@gmail.com

Аннотация. В обзоре рассмотрены главные тенденции в мировом производстве и потреблении энергии за последние полвека, отталкиваясь от анализа, проделанного П.Л. Капицей в 1975 г. на основе унифицированного подхода с использованием вектора Умова—Пойнтинга. Затронуты такие проблемы, как влияние энергопотребления на валовой национальный продукт на душу населения, причины различных подходов стран к переходу на возобновляемые источники энергии, существующие источники энергии, глобальное распределение производства и потребления энергии, особенности и перспективы различных энергетических технологий, а также технологии, позволяющие снизить энергопотребление. Так, с 1975 г. цена одного киловатт-часа «солнечной» электроэнергии снизилась на порядки величины, что позволило этой технологии выдвинуться на передний план, в то время как термоядерный синтез по-прежнему остается «энергетикой будущего», а уголь продолжает удерживать ведущие позиции на рынке производства электроэнергии. Основным потребителем энергии стали электроника и телекоммуникации, что диктует потребность перехода от архитектуры фон Ноймана к нейроморфным технологиям в компьютерах и развития фемтоваттной оптоэлектроники. Неожиданно, крупнейшим потребителем энергии стал майнинг криптовалют. Кроме того сбор рассеянной энергии самыми разными способами рассматривается как экологичная альтернатива использованию батарей в устройствах малой и сверхмалой мощности.

Ключевые слова: производство энергии, потребление энергии, сбор энергии

Благодарности: Автор выражает свою признательность Дитеру Бимбергу, пробудившему его интерес к глобальной энергетической проблеме, а также Гуннару Суханеку и Алексею Н. Михайлову за критическое прочтение рукописи и сделанные замечания.

Финансирование: Данное исследование было поддержано проектом i3N (UIDB/50025/2020, UIDP/50025/2020 и LA/P/0037/2020), который финансировался из национальных средств через Фонд науки и технологий (FCT) и Министерство образования и науки (MEC) Португалии.

Для цитирования: Соболев Н.А. Энергия, спрос на вычислительную мощность и «зеленый» мир. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2024; 27(2): 175—193. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202406.597>

© 2024 National University of Science and Technology “MISIS”.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Energy, demand for computing power and the green world

N. A. Sobolev✉

Departamento de Física and i3N, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal

✉ *Corresponding author: niksob@gmail.com*

Abstract. The review considers the main trends in global energy production and consumption over the last half century, based on the analysis made by P.L. Kapitza in 1975 based on a unified approach using the Umov–Poynting vector. Such aspects of the problem as the impact of energy consumption on gross national product per capita, reasons for different approaches of countries to the transition to renewable energy sources, existing sources of energy, global distribution of its production and consumption, features and prospects of different energy technologies, as well as technologies to reduce energy consumption are touched upon. Thus, since 1975, the price of one kilowatt-hour of “solar” electricity has fallen by orders of magnitude and this technology has moved to the forefront, while fusion still remains the “energy of the future” and coal continues to hold its position in the market. Somewhat unexpectedly, electronics and telecommunications have become a major consumer of energy, urging a shift from von Neumann architecture to neuromorphic technology in computers and the development of femto and attowatt optoelectronics. And a totally unforeseen energy consumer has been cryptocurrency mining. On the other hand, the harvesting of dissipated energy in a variety of ways is seen as an environmentally friendly alternative to the use of batteries in low and ultra-low-power devices.

Keywords: energy production, energy consumption, energy harvesting

Acknowledgments: The author is grateful to Dieter Bimberg, who awakened his interest in the global energy issue, and to Gunnar Suchanek and Alexey N. Mikhaylov for critical reading of the manuscript and comments made.

Funding: This study was supported by the project i3N (UIDB/50025/2020, UIDP/50025/2020 and LA/P/0037/2020) which was financed by national funds through the Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) and the Ministério da Educação e Ciência (MEC) of Portugal.

For citation: Sobolev N.A. Energy, demand for computing power and the green world. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2024; 27(2): 175—193. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202406.597>

Введение

Еще в 1975 г. выдающийся советский физик П.Л. Капица, бывший ученик Резерфорда и впоследствии Нобелевский лауреат 1978 г., прочитал доклад, опубликованный затем в [1], который начал словами «Общепризнано, что основным фактором, определяющим развитие материальной культуры людей, является создание и использование источников энергии». Он привел график, отражающий четкую корреляцию между энергопотреблением и валовым национальным продуктом (ВНП) на душу населения в разных странах. Затем он проанализировал состояние и перспективы различных способов получения энергии. Крайне интересно проанализировать, что изменилось в этом отношении за прошедшие почти полвека и оправдались ли прогнозы великого ученого. Заметим, однако, что Капица не рассматривал вопрос потребления энергии разными отраслями народного хозяйства.

С тех пор электроника и телекоммуникации стали новым глобальным потребителем энергии, а в проблеме получения и распределения энергии появился новый аспект — глобальное потепление. Обратимся к энергетической проблеме, опираясь на анализ Капицы и используя современные данные.

Существующие главные источники энергии

Посмотрим вначале на связь между энергопотреблением и ВНП на душу населения в настоящее время. Из рис. 1 видно, что это отношение с 1975 г. не изменилось. За исключением некоторого разброса точек (впрочем, вполне естественного) корреляция вполне однозначна.

Обратимся теперь к терминологии, используемой ООН: «Возобновляемая энергия — это энергия, получаемая из природных источников, которые пополняются с большей скоростью, чем расходуются. ... С другой стороны, ископаемое топли-



Рис. 1. Валовой национальный продукт на душу населения в сравнении с энергопотреблением, 2015 г. *Источник:* Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/energy-use-per-capita-vs-gdp-per-capita> (дата обращения: 10.04.2024).

Fig. 1. GNP per capita versus energy consumption in 2015. *Source:* Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/energy-use-per-capita-vs-gdp-per-capita> (accessed on 10.04.2024).

во — уголь, нефть и газ — это невозобновляемые ресурсы, на образование которых уходят сотни миллионов лет. Ископаемое топливо, сжигаемое

для производства энергии, приводит к выбросам вредных парниковых газов, таких как углекислый газ» [2]. Кажется бы, все ясно: человечество должно срочно перейти к использованию возобновляемых источников энергии. На деле все не так просто и очевидно [3].

Из рис. 2 видно, что в 2022 г. уголь по-прежнему лидирует в мировом производстве электроэнергии (35%), далее — природный газ (23%) и энергия гидроэлектростанций (15%). Это не случайно, так как основным преимуществом таких энергоносителей, как нефть, газ и уголь, является их высокая плотность энергии (12 кВт·ч/кг в случае бензина [4] против современной плотности энергии автомобильного аккумулятора около 0,26—0,27 (кВт·ч)/кг [5]). Однако использование ископаемых источников энергии приводит к огромным выбросам CO₂ — парникового газа, который, как полагают, приводит к глобальному потеплению со всеми вытекающими негативными последствиями¹.

Другим недостатком ископаемых энергоносителей является низкая энергоэффективность (менее 28%), характерная для двигателей внутреннего сгорания, в отличие от очень высокого КПД электродвигателя, превышающего 93%, что позволяет значительно экономить электроэнергию [6].

Аналогичным образом, существует, например, огромная разница в эффективности между газовой

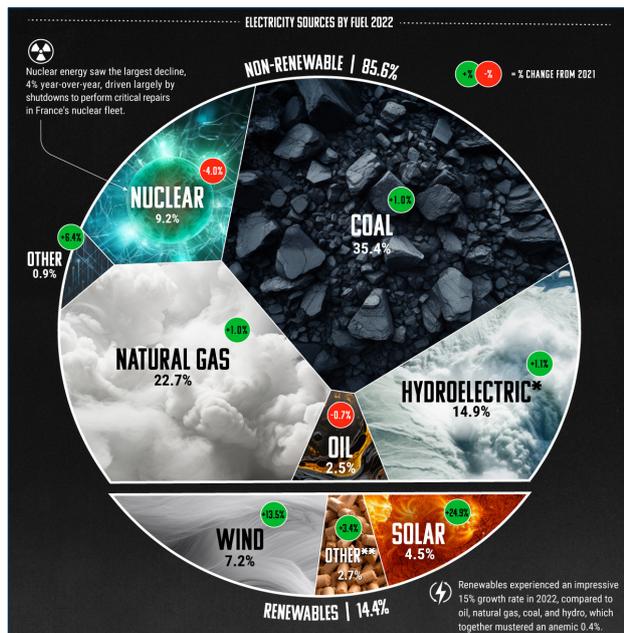


Рис. 2. Относительный вклад различных источников в мировое производство электроэнергии в 2022 г.

Источник: Dickert C. What Electricity Sources Power the World? September 10, 2023. <https://elements.visualcapitalist.com/what-electricity-sources-power-the-world/> (дата обращения: 10.04.2024).

Fig. 2. Relative contribution of different sources to global electricity production in 2022. *Source:* Dickert C. What Electricity Sources Power the World? September 10, 2023. <https://elements.visualcapitalist.com/what-electricity-sources-power-the-world/> (accessed on 10.04.2024).

¹ Отметим, что существуют и другие мнения на этот счет, но в данной статье будем исходить из того, что это утверждение верно.

ми котлами и тепловыми насосами: использование последних способствует экономии энергии и снижению выбросов CO_2 . Однако установка теплового насоса — очень дорогое удовольствие [7].

Итак, чтобы спасти нашу планету и человечество от негативных последствий изменения климата, необходимо сократить выбросы CO_2 , т. е. осуществить так называемую декарбонизацию. Для этого необходимы новые альтернативные технологии, удовлетворяющие ряду требований [8]:

- более высокая плотность энергии;
- отсутствие выбросов CO_2 ;
- более высокая энергетическая эффективность.

В 2050 г. доля населения планеты, проживающего в городах, увеличится с 55 до 68 %, поэтому декарбонизация городов приобретает первостепенное значение для предотвращения нежелательного воздействия на климат [9].

Процесс декарбонизации подразумевает постепенное вовлечение возобновляемых источников в производство энергии. Рисунок 3 отражает предполагаемую динамику производства электроэнергии с использованием различных источников для удержания повышения средней температуры на планете к 2050 г. в пределах $1,5^\circ\text{C}$. Как видно, основным источником достижения поставленной цели является ускоренное развитие солнечной энергетики и энергии ветра.

Глобальное производство и потребление энергии

Не для всех стран борьба с глобальным потеплением является основным приоритетом энергетической политики, что и зафиксировано в заключительном документе совещания министров по энергетическим переходам стран G20 в Гоа, Индия, 22 июля 2023 г.: «Учитывая, что ископаемое топливо в настоящее время продолжает играть значительную роль в глобальном энергобалансе, искоренении энергетической бедности и удовлетворении растущего спроса на энергию, некоторые члены Совета подчеркнули важность усилий по поэтапному отказу от использования ископаемого топлива в соответствии с различными национальными условиями, в то время как другие придерживались иного мнения о том, что технологии снижения и удаления выбросов позволят решить эти проблемы.» [10]. Серьезные разногласия между странами появились и на конференции COP28 UAE — United Nations Climate Change Conference в Дубаи [11].

Разногласия возникают из-за катастрофической ситуации, сложившейся с энергопотреблением и доступом к электроэнергии во многих странах Африки, Азии и Океании (рис. 4 и 5). В то время как в странах Северной Америки и Европы суммарное

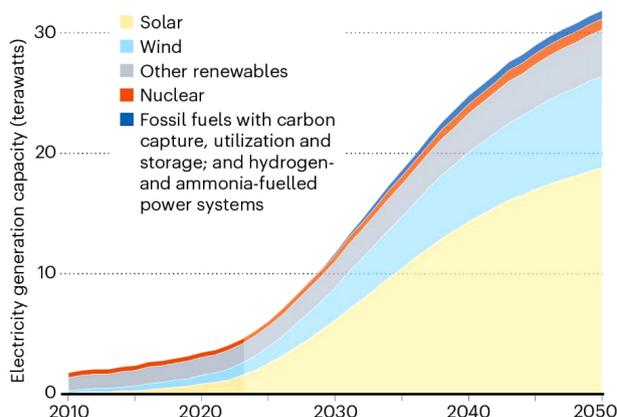


Рис. 3. Ожидаемая динамика производства электроэнергии [8]

Fig. 3. Expected dynamics of electricity generation [8]

энергопотребление не растет уже десятки лет, Азиатско-Тихоокеанский регион демонстрирует взрывной рост годового потребления первичной энергии (рис. 6) [12].

Рассмотрим развитие производства альтернативной (т. е. возобновляемой) энергии в разных странах (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что одни страны наращивают производство возобновляемой энергии, в то время как другие сокращают его, особенно на Европейском континенте. Темпы инновационной деятельности в области производства возобновляемой энергии, измеряемые количеством полученных патентов, за последние два десятилетия росли только в Китае, причем после 2008 г. Китай намного обошел весь остальной мир (рис. 8).

Интересным и показательным исключением является Швеция, где рост ВВП на душу населения с 1995 г. достигался при некотором снижении энергопотребления (рис. 9).

Больших энергозатрат также требует мыслительная деятельность: при своей средней массе в 1350 г мозг потребляет от 9—10 % в покое и до 25 % (в некоторых источниках утверждается, что до 60 % [13]) в периоды максимальной активности от всей энергии человеческого организма средней массой 75 кг (разница в массе 55 раз!). В мозге крысы 25 % энергии расходуется на поддержание жизненно важных функций организма, а 75 % — на обработку информации [14]. Это означает, что умственная работа гораздо более трудоемка, чем физическая. К тому же мозг — не КМОП-процессор и потребляет не только энергию, но и питательные вещества и производит продукты метаболизма, которые надо утилизировать.

Рассмотрим понятие «электронные мозги». В работе [15] были представлены прямые количественные данные о влиянии вычислительной мощности на такие области, как игровые (шахматы и го), предсказание погоды, сворачивание белков

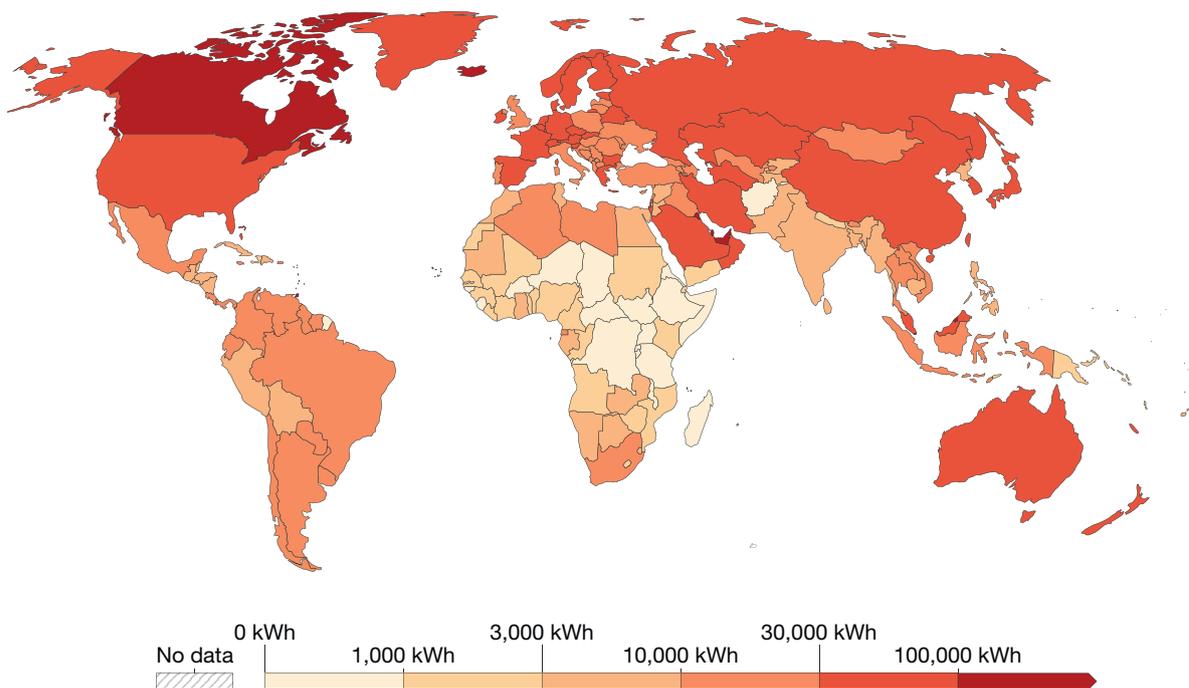


Рис. 4. Потребление энергии на душу населения в разных странах в 2022 г.
 Источник: Our World in Data. <https://ourworldindata.org/energy#explore-data-on-energy> (дата обращения: 10.04.2024).

Fig. 4. Energy use per person in different countries in 2022.
 Source: Our World in Data. <https://ourworldindata.org/energy#explore-data-on-energy> (accessed on 10.04.2024).

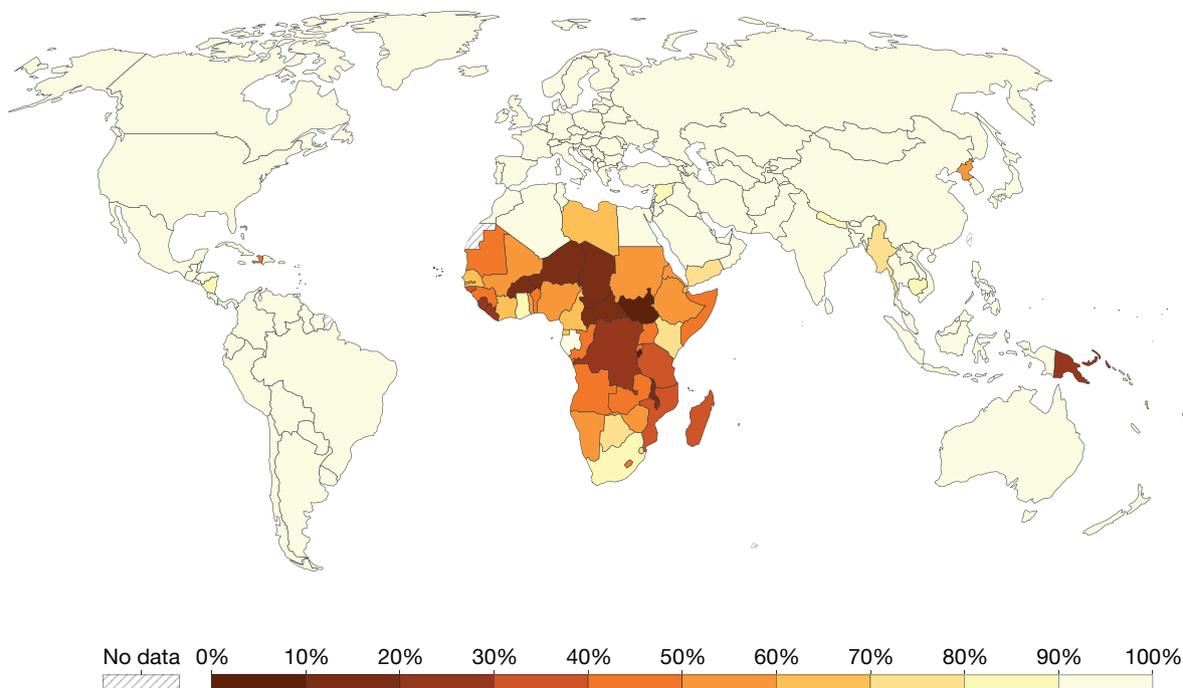


Рис. 5. Доступ к электрической энергии в разных странах в 2020 г.
 Источник: Our World in Data. <https://ourworldindata.org/energy#explore-data-on-energy> (дата обращения: 10.04.2024).

Fig. 5. Access to electrical energy in different countries in 2020.
 Source: Our World in Data. <https://ourworldindata.org/energy#explore-data-on-energy> (accessed on 10.04.2024).

и разведка нефти, и получен фундаментальный результат: вычислительная мощность объясняет 49—94 % прироста производительности в этих приложениях. Для получения линейного роста в этих областях требуется экспоненциальное увеличение вычислительной мощности в соответствии

с законом Мура [15]. Таким образом, сохранение последнего чрезвычайно важно для прогресса, и рост производительности во многих областях становится экономически неустойчивым, когда закон Мура перестает выполняться. За последнее десятилетие ситуация резко обострилась: если

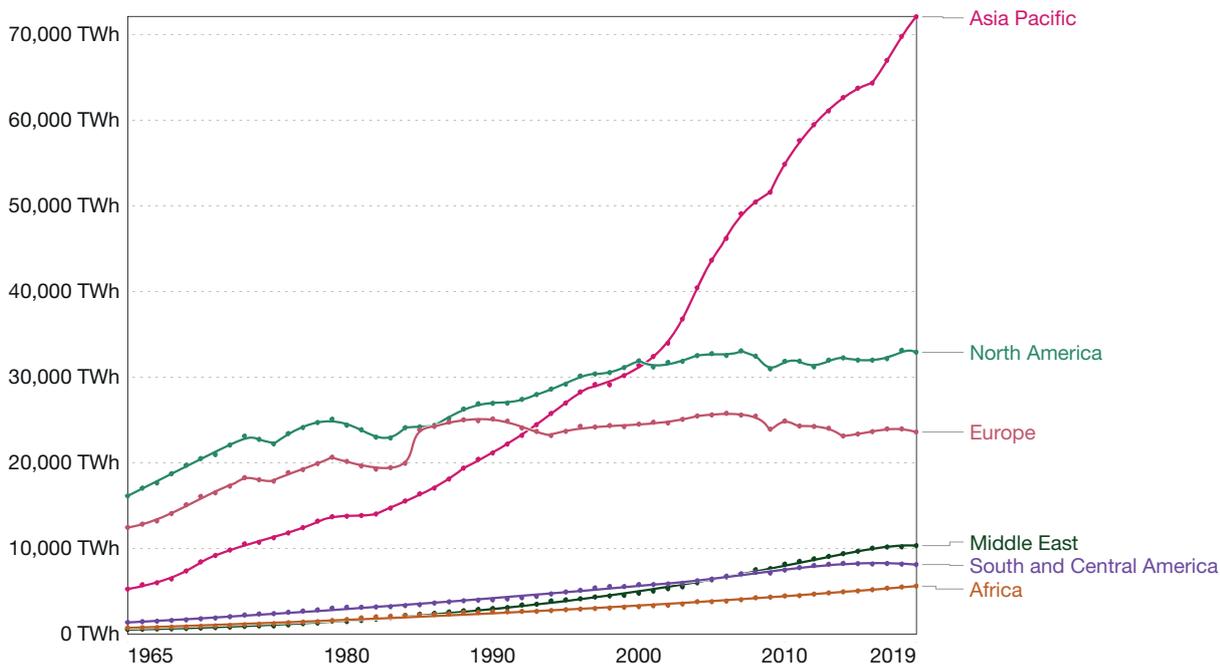


Рис. 6. Годичное потребление первичной энергии по регионам мира [12]

Fig. 6. Annual primary energy consumption by world region [12]

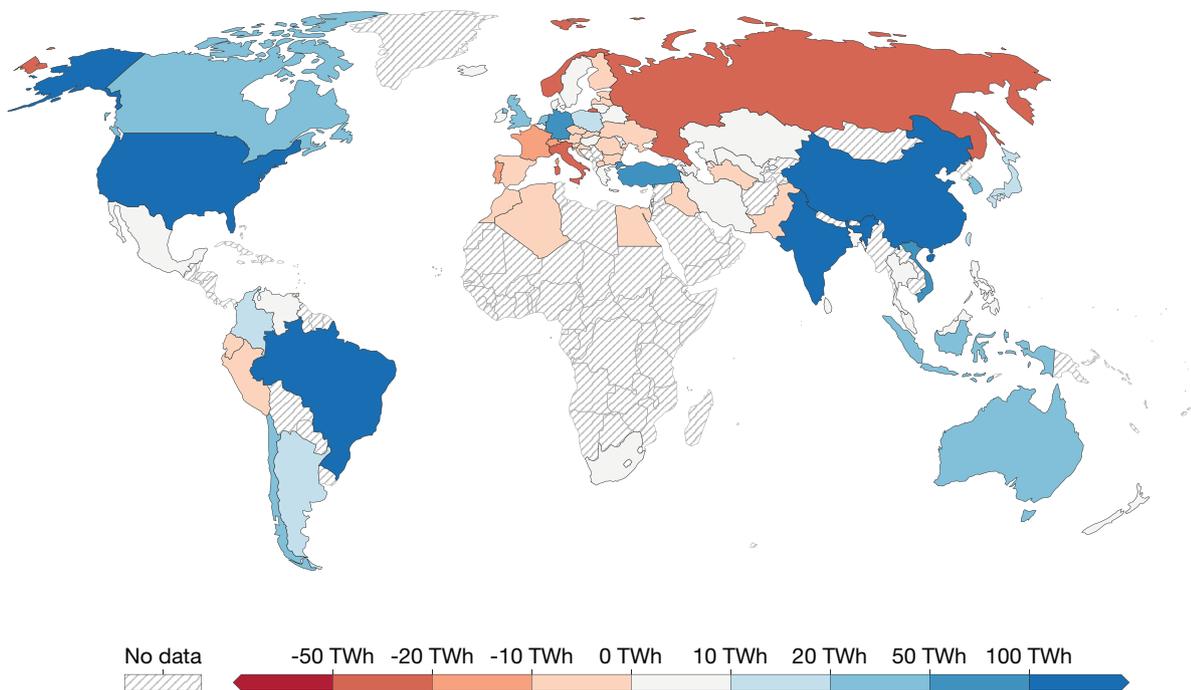


Рис. 7. Изменение годового производства возобновляемой энергии по странам мира в 2022 г. по сравнению с 2021 г. Источник: Energy Institute Statistical Review of World Energy. 2023. <https://www.energyinst.org/statistical-review> (дата обращения: 10.04.2024).

Fig. 7. Change in annual renewable energy production by country in 2022 compared to 2021. Source: Energy Institute Statistical Review of World Energy. 2023. <https://www.energyinst.org/statistical-review> (accessed on 10.04.2024).

до 2012 г. мировой спрос на вычислительную мощность удваивался каждые 24 мес., то затем период удвоения внезапно сократился примерно до 2 мес. [16]. Таким образом, растущий спрос на вычислительную мощность значительно опережает улучшения, достигнутые благодаря масштабированию по закону Мура [17].

Установлено, что машинное обучение (ML) стремится в пределе к потреблению всей производимой в мире энергии, а такая модель развития является дорогостоящей, неэффективной и неустойчивой. Цифры потребляемой мощности становятся огромными, что было подтверждено на конференции 2022 Design Automation Conference (рис. 10).

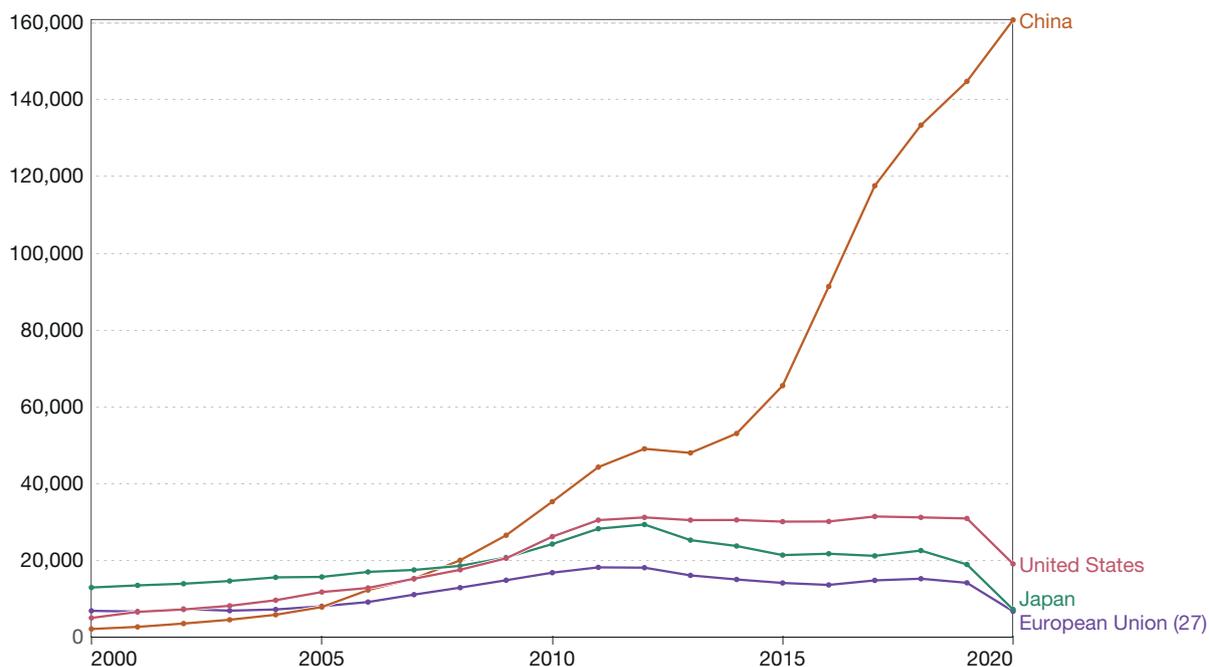


Рис. 8. Количество патентов в области возобновляемой энергии по странам, начиная с 2000 г.
 Источник: Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/patents-for-renewables-by-country?tab=chart> (дата обращения: 10.04.2024).

Fig. 8. Number of renewable energy patents by country since 2000.
 Source: Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/patents-for-renewables-by-country?tab=chart> (accessed on 10.04.2024).

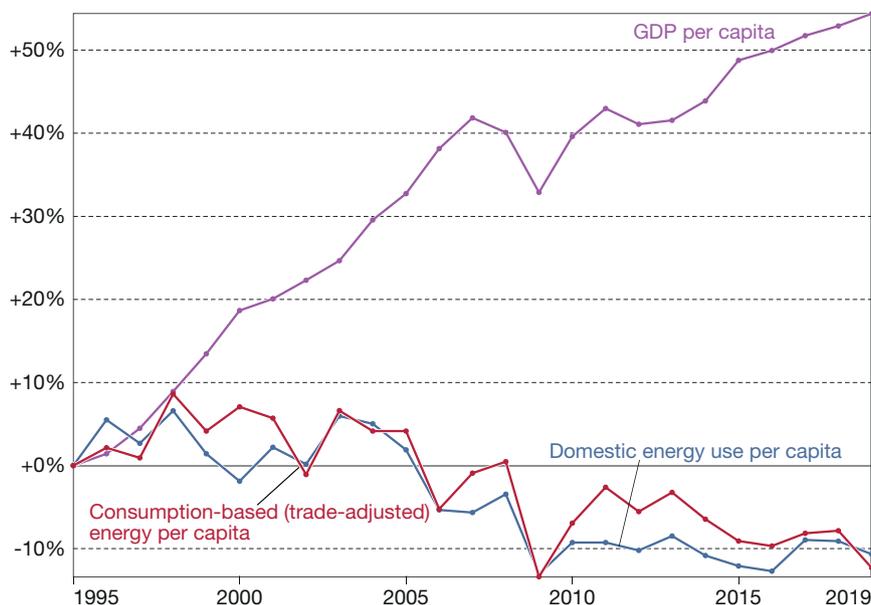


Рис. 9. Изменение потребления энергии в сравнении с изменением ВВП на душу населения в Швеции с 1995 г.
 Источник: Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/change-energy-gdp-per-capita> (дата обращения: 10.04.2024).

Fig. 9. Change in energy use versus changes in GNP per capita in Sweden since 1995.
 Source: Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/change-energy-gdp-per-capita> (accessed on 10.04.2024).

Еще одним известным компьютерным пожирателем энергии является майнинг криптовалют. По оценкам, только биткоин потребляет 127 ТВт · ч в год, что превышает энергопотребление многих стран, например Норвегии. В США криптовалютный бизнес выбрасывает в атмосферу от 25 до 50 мегатонн CO₂ в год — это сопоставимо с выбросами от сжигания дизельного топлива на амери-

канских железных дорогах [18]. Для производства такого количества электроэнергии необходимы 100 угольных электростанций. Этой энергии достаточно для зарядки более 200 миллионов полностью электрических автомобилей, проезжающих 10 000 километров в год, а в 2022 г. в мире насчитывалось всего 26 миллионов таких автомобилей [19].

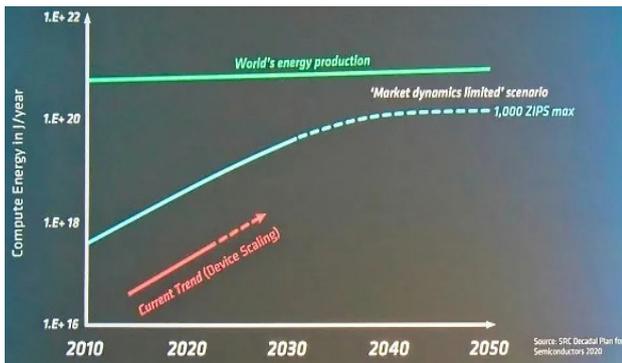


Рис. 10. Прогноз затрат энергии на вычисления в сравнении с ее глобальным производством вплоть до 2050 г. Источник: Bailey B. AI power consumption exploding. August 15, 2022. Semiconductor Engineering. <https://semiengineering.com/ai-power-consumption-exploding/?cmid=1c9a6ebe-071d-4b5f-9433-f084336b9289> (дата обращения: 10.04.2024).

Fig. 10. Projection of energy expenditure on computing compared to its global production up to 2050. Source: Bailey B. AI power consumption exploding. August 15, 2022. Semiconductor Engineering. <https://semiengineering.com/ai-power-consumption-exploding/?cmid=1c9a6ebe-071d-4b5f-9433-f084336b9289> (accessed on 10.04.2024).

В мировом сообществе вызывает беспокойство «водный след» (*water footprint*) биткоина, который в последнее время стремительно растет. По сравнению с 2020 г. в 2021 г. он увеличился в 2,66 раза, с 591 до 1574 Гл (с 5231 до 16279 л на транзакцию соответственно). В 2023 г. «водный» след биткоина составил 2237 Гл [20].

В 2020 г. около 50 % всех биткоин-ферм в мире находилось в Китае [21], где электроэнергия, произведенная на угольных электростанциях, была недорогой. Правительство попыталось снизить этот показатель, запретив майнинг биткоина в сентя-

бре 2021 г. По состоянию на конец 2023 г. США являются мировым лидером по добыче криптовалюты [22]. Можно привести и другие данные, которые согласуются с описанной тенденцией [23]: в 2022 г. интернет потреблял 800 ТВт · ч электроэнергии, а к 2030 г. потребность в энергии, вероятно, удвоится.

Затраты на электроэнергию и охлаждение инфраструктуры уже превысили стоимость самого ИТ-оборудования [24]. Лиза Су, генеральный директор AMD, предсказала, что в 2035 г. для работы одного суперкомпьютера будет использоваться половина энергии целой атомной электростанции [25]. Бывший сотрудник OpenAI Леопольд Ашенбреннер в своем недавнем обзоре предположил, что к 2030 г. датацентры потребуют для тренировки моделей энергию, сравнимую со всей электрогенерацией в США [26]. Он сравнил проект по разработке сильного искусственного интеллекта (AGI) с Манхэттенским проектом как наиболее приоритетный для обеспечения национальной безопасности США.

Чтобы понять, где можно сэкономить, интересно посмотреть на порядки величины энергозатрат, связанных с различными технологиями (рис. 11) [27].

Таким образом, можно сказать, что объемы энергопотребления огромны и постоянно растут. Для уменьшения объемов производства и потребления электроэнергии необходимо решить следующие задачи:

- 1) производить больше (негативные последствия: глобальное потепление, загрязнение окружающей среды)²;

² Согласно исследованию, проведенному накануне конференции COP28, от загрязнения воздуха ежегодно

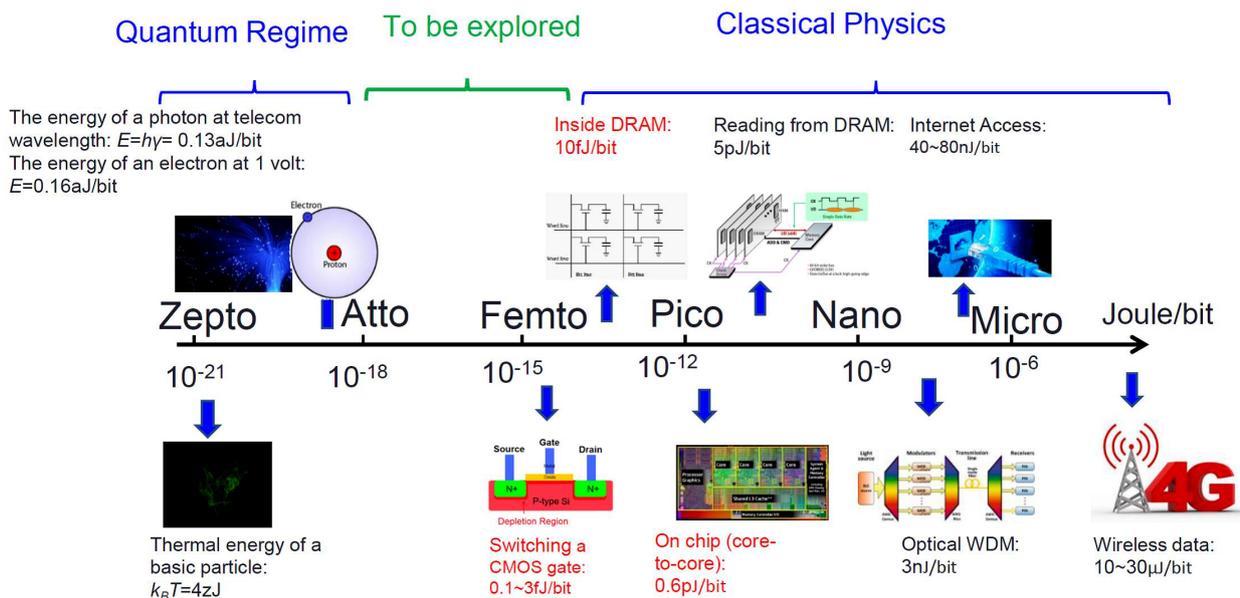


Рис. 11. Технологии оптоэлектроники для низкоэнергетической обработки информации и связи. Источник: рисунок создан Аланом Вангом по данным Д.А.Б. Миллера, 2017 [27]

Fig. 11. Optoelectronic technologies for low-energy information processing and communications. Source: Figure plotted by Alan Wang according to the data from D.A.B. Miller, 2017 [27]

2) потреблять меньше (негативные последствия: возможно замедление технического прогресса и снижение уровня жизни населения).

Для решения первой задачи необходимо воспользоваться анализом, проведенным П.Л. Капицей [1], для второй задачи надо изучить порядки величины энергозатрат, связанных с различными технологиями (см. рис. 11) и выбрать наименее энергозатратные.

Энергетические технологии

Энергетические технологии — наука об энергетике, область технических наук, комплекс технологий, используемых в процессе получения, передачи и использования видов энергии и энергетических ресурсов.

Для преобразования энергии в любую другую форму необходимо понимать, что в материальной среде поток энергии \mathbf{U} ограничен выражением $\mathbf{U} < \mathbf{v}F$, где вектор \mathbf{v} — скорость распространения деформации (обычно скорость звука), F может быть любой упругой или тепловой энергией, а \mathbf{U} — вектор Умова—Пойнтинга. В стационарных процессах $\text{div}\mathbf{U}$ определяет величину преобразования энергии в любую другую форму.

Ограничение на плотность потока энергии означает, что для получения большой мощности придется исключить ряд весьма эффективных процессов преобразования энергии. Но пойдем по порядку, следуя П.Л. Капице³.

Рассмотрим основные виды и источники энергии.

Геотермальная энергия. К ее преимуществам относятся неисчерпаемые запасы энергии и возможность генерировать ее 24 ч в сутки 365 дней в году. Основным недостатком являются ограничения, накладываемые низкой теплопроводностью горных пород, что приводит к малой плотности потока энергии.

Гидроэнергия вырабатывается путем запруживания рек и использования приливов и позволяет эффективно преобразовывать гравитационную энергию в механическую. Кроме того, гидроэлектростанции позволяют оперативно варьировать отдаваемую в сеть мощность, компенсируя волатильность других источников. Главный недостаток

умирают восемь миллионов человек во всем мире. Что еще хуже: эксперты утверждают, что кризис становится все глубже. *Источник:* Martin V.St. At COP28, a growing sense of alarm over the harms of air pollution. December 6, 2023. Inside Climate News. <https://insideclimatenews.org/news/06122023/cop28-growing-alarm-air-pollution-harms/?et rid=35096604&et cid=5059919> (дата обращения: 10.04.2024).

³ Ссылки будут даваться, как правило, только на те источники, которые появились после статьи Капицы [1] и несут новую информацию.

заключается в том, что плотины на реках целесообразно строить только в горных районах, где потенциальная энергия на единицу площади водоема высока. На равнинах плотины не оправдывают себя ни с экономической, ни с экологической точки зрения, особенно когда речь идет о затоплении плодородных земель. Приливные же электростанции рентабельны только там, где приливы и отливы достаточно высоки, а таких мест не так уж много.

Ветроэнергетика экологически безопасна. К очевидным недостаткам можно отнести небольшую плотность потока энергии и нестабильность вырабатываемой мощности.

Благодаря большим запасам урана *ядерная энергетика* способна удовлетворить потребности человечества на тысячелетия. Однако безопасное хранение ядерных отходов является проблематичным (например, Кыштымская катастрофа). Существуют угрозы аварий на реакторах (например, Чок–Ривер, Три–Майл–Айленд, Чернобыль, Фукусима — все они хотя бы частично вызваны человеческим фактором), масштабное распространение плутония и связанный с этим риск ядерного терроризма, а также саботаж или войны. Возможным решением может стать усиление международного контроля.

П.Л. Капица считал атомную энергетику наиболее перспективной [1]. В последние десятилетия в некоторых странах преобладала противоположная тенденция, но совсем недавно на саммите по атомной энергии 21 марта 2024 г. в Брюсселе лидеры ЕС подтвердили ценность и потенциальную роль атомной энергетики в достижении климатических целей ЕС [28].

Термоядерный синтез — неисчерпаемый источник энергии благодаря запасам дейтерия в океанах. Кроме того, практически не образуются радиоактивные отходы, опасность в случае поломки реактора невелика. К сожалению, плазма нагревается за счет приложения электрического поля, поэтому почти вся энергия достается электронам, которые из-за своей малой массы плохо передают энергию ионам при столкновениях. Кроме того, большая часть энергии электронов теряется на тормозное излучение. Следует отметить, что, несмотря на значительные усилия, предпринимаемые во всем мире, начиная с середины прошлого века, до сих пор не существует термоядерной установки, которая производила бы больше энергии, чем расходует на ее работу. Вот уже 70 лет термоядерная энергия остается «энергией будущего». По оценкам ученых термоядерный синтез вряд ли будет конкурентоспособной технологией даже после 2040 г. [29].

Прямое преобразование химической энергии в механическую (как это происходит в мышцах) является экологически чистой технологией. Однако плотность энергии ограничена медленными

процессами диффузии в биологических мембранах или на поверхности мышечных волокон. Именно поэтому произошла промышленная революция — машины заменили мускульную силу человека и животных.

Топливные элементы также представляют собой экологически чистую технологию (без выбросов CO_2), напрямую преобразуя химическую энергию, выделяющуюся при окислении водорода, в электрическую. Более того, они демонстрируют высокий КПД для получения электрической энергии (более 65 % для топливных элементов с протонообменной мембраной и даже более 85 % для твердооксидных топливных элементов) [30]. Однако, скорость диффузионных процессов в электролитах очень низка, а водород по-прежнему дорог.

Существуют различные технологии получения водорода. Наиболее распространенной является электролиз воды с получением водорода и кислорода. Кроме того, согласно недавней модели, разработанной Геологической службой США (USGS), природного водорода, образующегося в результате реакции воды с горными породами в глубине Земли, может быть достаточно для удовлетворения растущего мирового спроса в течение нескольких тысяч лет [31]. Важно отметить, что водород отвечает современным требованиям к возможным видам топлива, имея плотность энергии 33,3 кВт·ч/кг [4] (против 12 кВт·ч/кг у бензина). Грубо говоря, для производства одного килограмма водорода путем электролиза требуется 50 кВт·ч, в котором, как указано выше, содержится 33,3 кВт·ч энергии. Это определяет среднюю энергетическую эффективность, равную примерно 65 % [30]. Стратегическое значение приобрели различные энергоносители на основе водорода: водород под давлением и в жидком виде, метанол, аммиак, жидкие органические водородные носители и т. д., что облегчает их транспортировку и использование [30].

Солнечная энергия для расщепления воды и получения водорода — еще одна чистая технология (но есть сомнения). К сожалению, до сих пор не существует жизнеспособной технологии для промышленного применения [32].

Солнечная энергия для фотовольтаики — это чаша Святого Грааля для энергетиков. Она считается экологически чистой технологией. Существует ряд недостатков: в производстве кремниевых солнечных батарей используются высокотоксичные вещества, а вопрос утилизации солнечных панелей по истечении срока их службы становится все более сложным [33]; низкая плотность энергии, непостоянство инсоляции во времени и по поверхности Земли, а также большие расстояния между солнечными фермами (например, в Сахаре) и промышленными потребителями (например, в Европе).

Раньше серьезной проблемой была высокая стоимость солнечной электроэнергии (в 1975 г. даже П.Л. Капица не знал, как сделать ее экономически выгодной [1]). Однако с появлением новых более дешевых источников стоимость этого вида энергии стала снижаться (рис. 12). Более того, в 2023 г. цены на солнечные фотоэлектрические модули упали еще на 45 % и стали дешевле, чем когда-либо в истории [34]. Солнечные панели теперь стали использоваться в качестве ограждений на садовых участках [35]. По прогнозам Международного энергетического агентства, к концу 2024 г. мировое предложение солнечных батарей составит 1100 ГВт, что втрое превысит спрос и приведет к падению цен еще на 40 % к 2028 г. [36].

В 2022 г. на долю фотовольтаики приходилось 4,5 % мирового производства электроэнергии (см. рис. 2), что делает ее третьим по значимости источником возобновляемой энергии после гидро- и ветроэнергетики. Ожидается, что в среднесрочной перспективе доля этих трех видов энергии будет расти экспоненциально и достигнет 40 % к 2035 г. и 45 % к 2050 г. [37]. В целом ожидается, что в середине XXI в. на возобновляемые источники будет приходиться 90 % производства энергии, из которых около половины — на солнечную энергию [38].

Первый солнечный элемент (**СЭ**), изобретенный в 1954 г., был основан на $p-n$ -переходе [39], принцип работы большинства современных СЭ до сих пор остается тем же. С тех пор другие технологии, такие как гетеропереходы, антиотражающие покрытия, тонкопленочные абсорберы, солнечные концентраторы, интеграция различных переходов, т. е. многопереходные и основанные на промежуточных зонах энергии СЭ, использование новых

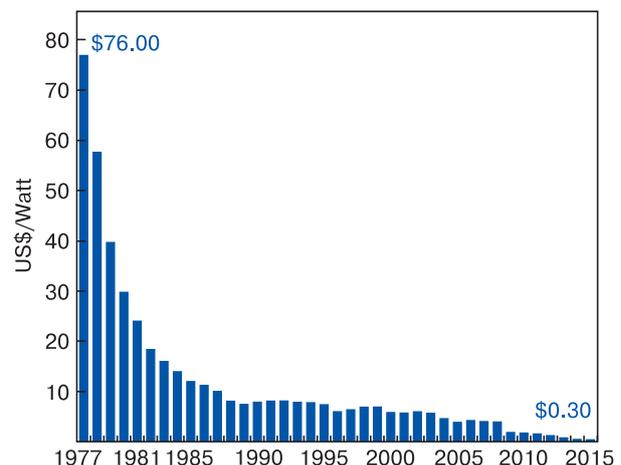


Рис. 12. Динамика цены одного ватта для обычных солнечных батарей (c-Si), начиная с 1977 г. Источник: Solar cell. https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell (дата обращения: 10.04.2024).

Fig. 12. Development of prices per watt for conventional solar cells (c-Si) since 1977. Source: Solar cell. https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell (accessed on 10.04.2024).

материалов, таких как перовскиты, позволили повысить эффективность. В итоге на кремниевые технологии по-прежнему приходится около 97 % мирового рынка солнечных батарей [36].

Чтобы преодолеть главный недостаток солнечной энергии — ее непостоянство, научное сообщество потратило несколько десятилетий на исследование космической солнечной энергетики (SBSP), в которой орбитальные спутники будут собирать энергию 24 часа в сутки 7 дней в неделю и 365 дней в году. В июне 2023 г. команда проекта Space Solar Power Project (SSPP) Калифорнийского технологического института (Калтеха) объявила, что их космический прототип под названием Space Solar Power Demonstrator (SSPD-1) передал полученную энергию на микроволновые приемники, установленные на крыше кампуса Калтеха в Пасадене, штат Калифорния. Согласно Science Alert [40], эксперимент, известный как Microwave Array for Power-transfer Low-orbit Experiment (или MAPLE), является одним из трех исследовательских проектов, осуществляемых на борту SSPD-1. Платформа основана на недорогих кремниевых технологиях. Однако в докладе, опубликованном Управлением по технологиям, политике и стратегии НАСА (OTPS) в январе 2024 г., сообщается, что космические проекты солнечных батарей обходятся в 12—80 раз дороже, чем их наземные аналоги [41].

Рассмотрим историческое развитие рекордных значений квантовой эффективности СЭ, начиная с 1975 г. За последнее десятилетие многопереходные СЭ прошли путь от эффективности около 35 % до недавнего рекорда в 47,1 %. Эффективность серийных ячеек, как правило, отстает от показателей ячеек-чемпионов примерно на 2 года (рис. 13).

Энергосберегающие технологии электроники

Энергозатраты на обработку и передачу данных по всему миру высоки, поэтому существует острая необходимость в разработке соответствующих энергоэффективных устройств.

Тензорные и графические процессоры (TPU и GPU) используют традиционную архитектуру фон Ноймана, т. е. обработка и хранение информации осуществляются разными процессорными блоками: вычисления — в ядрах, хранение — в оперативной памяти, при этом один блок памяти приходится на несколько десятков или сотен ядер. Это требует частого обмена данными между ядрами и памятью, что обуславливает относительно высокое энергопотребление и низкую энергоэффективность обработки данных; типичные значения тепловыделения современного GPU составляют 200—300 Вт при производительности около 10^{13} операций (ум-

ножение—добавление/запись в буфер/стирание и т. д.) в секунду (10 TFLOPS).

Рассмотрим основные возможности снижения расхода энергии в сфере информационных технологий.

NorthPole. В 2023 г. был предложен чип с архитектурой, вдохновленной нейронами, под названием NorthPole [42], который достигает значительно более высокой производительности, энергоэффективности и экономии площади по сравнению с другими сопоставимыми архитектурами. Ключевой особенностью этого чипа является учет того факта, что практически для всех видов вычислений доступ к памяти играет такую же важную роль, как и логическая обработка. В отличие от аналоговых вычислений в памяти, эта чисто цифровая система имеет возможность настраивать битовую точность по мере необходимости, что позволяет оптимизировать энергопотребление.

Бестранзисторная архитектура вычислений в памяти. В архитектуре вычислений в памяти (CIM) обработка и хранение данных происходят в одном месте, что позволяет сократить время передачи данных и минимизировать потребление энергии. Но даже при использовании архитектуры CIM транзисторы влияют на время доступа к данным, требуя большого количества проводов в общей схеме чипа и, таким образом, расходуя время, пространство и энергию в большем объеме, чем хотелось бы для нейроморфных вычислений. Бестранзисторная конструкция CIM, предложенная недавно [30], проста, миниатюрна и быстра, обеспечивая очень низкое энергопотребление. Эта архитектура выполняет три вычислительные задачи: поиск, хранение и нейросетевые операции, что является основополагающим для приложений искусственного интеллекта (ИИ).

Полупроводниковая спинтроника. Еще одна альтернатива традиционной электронике — использование свойств спина, а не заряда. Эта развивающаяся область, известная как полупроводниковая спинтроника [43], по сравнению с аналогичной электроникой обещает более энергоэффективные квантовые вычисления и хранение данных, а также другие возможности. Однако, несмотря на ряд достижений, прогресс в полупроводниковой спинтронике идет почти так же медленно, как в термоядерной энергетике⁴.

⁴ Другой, более успешной отраслью спинтроники является технология магнитной памяти, основанная на спин-зависимом рассеянии и туннелировании электронов. За открытие в 1988 г. гигантского магнитосопротивления (GMR) в сверхрешетках Fe/Cr Альбер Ферт и Петер Грюнберг были удостоены Нобелевской премии по физике 2007 г. Это открытие привело к революции в технологии жестких дисков. Еще раньше, в 1975 г., Мишель Жюльер открыл эффект туннельного магнитосопротивления (TMR) в структуре Fe/GeO/Co. В 2007 г. устройства

Квантовые вычисления. Квантовые вычисления основаны на замене цифровых битов на кубиты. Квантовые компьютеры могут использоваться в квантовой криптографии, квантовом машинном обучении, молекулярном моделировании и других областях, где обычные процессоры неэффективны. С другой стороны, квантовые компьютеры вряд ли смогут заменить классические компьютеры в ряде традиционных приложений. На сегодняшний день квантовые компьютеры еще не вышли за пределы лабораторий, поэтому их общий вклад в глобальное энергопотребление ничтожно мал.

Нейроморфные технологии. Магистральным путем развития компьютерной техники является, без сомнения, переход к нейроморфной архитектуре вычислительных систем [44], обладающей следующими преимуществами:

- конвергенция устройств обработки и хранения информации (CIM);
- матрично–векторное умножение на мемристорах для энергоэффективных систем ИИ [45];
- аппаратное исполнение весовых коэффициентов между нейронами (синаптические аналоги) на основе массивов мемристоров, многоуровневых или даже аналоговых ячеек электрически перезаписываемой памяти (ReRAM);
- работа на низких частотах при сохранении скорости вычислений (биологические нейронные сети работают на очень низких частотах (от единиц до сотен герц) по сравнению с традиционными процессорами);
- способность к (само)обучению, т. е. к самоорганизации или тонкой настройке дополнительных многозначных или аналоговых синаптических шкал для решения целевых задач (компьютерное зрение, слух, автономное управление и т. д.).

«Зеленая» фотоника — это разработка и применение элементной базы оптоэлектроники с рекордно высокой энергоэффективностью (см. рис. 11). Ярким примером является история снижения пороговой плотности тока полупроводниковых лазеров при переходе от $p-n$ -гомопереходов к гетероструктурам, затем к квантовым ямам и, наконец, к квантовым точкам (рис. 14) [46].

Краевой интеллект. Интеграция подходов, основанных на данных, с бортовым энергооборудованием для мониторинга системы, ее динамической адаптации и прогностического управления здоровьем (PHM) может быть достигнута с помощью методов проектирования, ориентированных на профиль миссии и получивших общее название *Edge intelligence* (что можно перевести как «Краевой интеллект») [47]. Их применение обещает достичь

на основе TMR эффекта с оксидом магния вместо оксида германия полностью вытеснили устройства на основе эффекта GMR на рынке устройств магнитного хранения информации.

динамичного повышения производительности системы и ее устойчивости к внешним воздействиям. Эти методы могут быть распространены далеко за пределы преобразователей энергии и даже электроники в целом, как показывает проект CAREER: Enhancing the State of Health and Performance of Electronics via in-situ Monitoring and Prediction (SHaPE–MaP) — Toward Edge Intelligence in Power Conversion, 2023, недавно профинансированный Национальным научным фондом США [48].

Силовые преобразователи с краевым интеллектом. На пути к «зеленому миру» силовые преобразователи играют все большую роль в энергетических системах. По данным Министерства энергетики США, к 2030 г. более 80 % электроэнергии будет проходить через силовые преобразователи [49]. Одна из таких систем называется «Устойчивое сельское хозяйство». На рис. 15 показана сельскохозяйственная энергетическая система на основе силовых преобразователей, в которой реализованы технологии чистой энергии, включая агровольтаику [50], хранение, очистку воды и управление энергосистемой [47].

Сбор рассеянной энергии

Сбор рассеянной энергии (СРЭ) — это процесс извлечения энергии из таких источников, как ветер, электромагнитные волны, солнечный свет, паразитные вибрации или движение тела.

Известно, что бесчисленные IoT-устройства питаются от батарей. Однако эти устройства могли бы либо самостоятельно добывать энергию, либо получать ее извне. Это позволило бы им работать практически бесконечно [51].

Существует несколько технологий СРЭ для маломощных приложений. Свет, тепло, ветер, вибрации, радиоволны и другие источники энергии

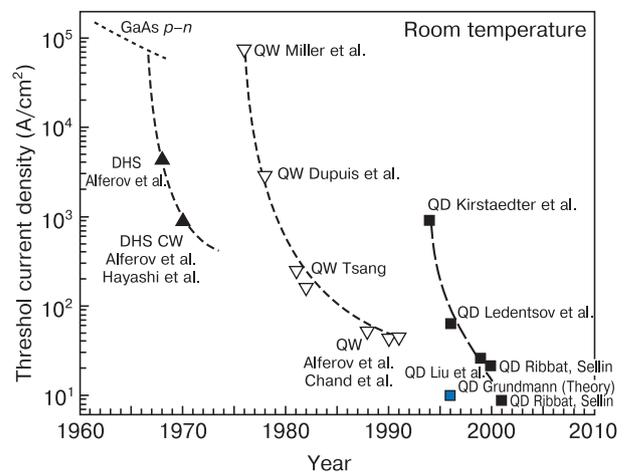


Рис. 14. История снижения пороговой плотности тока гетероструктурных лазеров [46]

Fig. 14. Historical development of the threshold current density of heterostructure lasers [46]

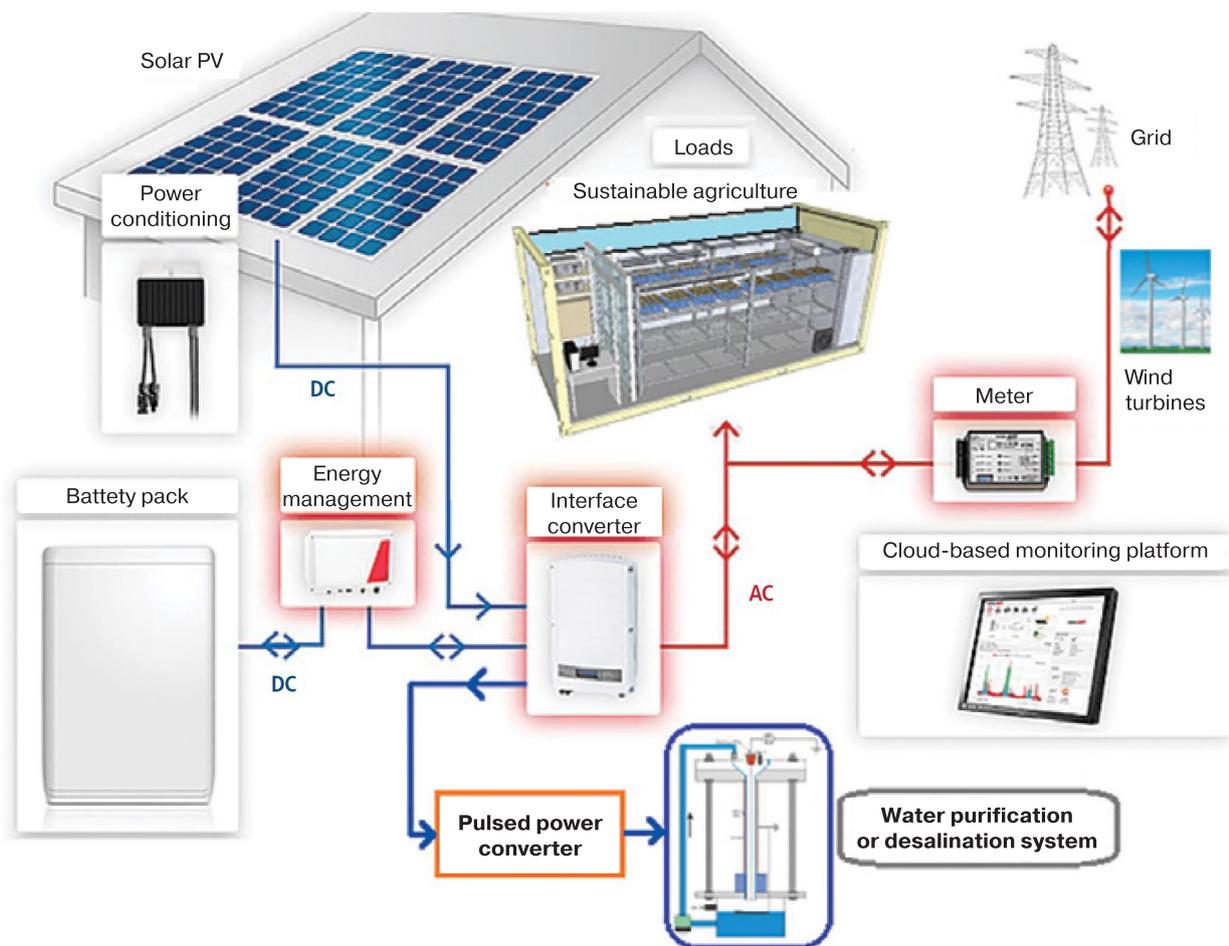


Рис. 15. Пример устойчивого сельскохозяйственного предприятия — интеграция технологий чистой энергии, сельскохозяйственного производства и систем очистки и опреснения воды с сетью на основе силовой электроники [47]
 Fig. 15. An example of a sustainable agricultural system combining power electronics, clean energy technologies, agriculture loads, and water purification/desalination facilities with the grid [47]

до сих пор находили ограниченное применение в небольших устройствах [52, 53]. Чтобы получить представление о требуемой мощности, рассмотрим данные по энергопотреблению медицинских имплантатов (табл. 1).

Наиболее типичной технологией СРЭ является использование *пьезоэлектрического эффекта*. Соответствующая энергия вырабатывается за счет связи между механической деформацией и электрической поляризацией в определенных кристаллах. Необходимая деформация может вызываться любым источником — движением транспортных средств, низкочастотными сейсмическими колебаниями, акустическими шумами и многими другими. (Не надо забывать про закон сохранения энергии — пьезогенератор в подошве кроссовок заставит бегуна тратить больше мускульной энергии.)

Этот источник поставляет энергию для различных приложений. Самые маленькие генераторы (до 50 мкВт) могут обеспечить энергией сверхмаломощные модули [55—57]. Однако в настоящее

время нет ни одного успешного коммерческого продукта, работающего на основе пьезогенератора [58].

Окружающие радиоволны существуют как в естественной, так и в искусственной среде. Однако большинство источников радиочастотного излучения имеют очень малую энергию, годную для

Таблица 1 / Table 1

Энергопотребление медицинских имплантов [54]

Power consumed by medical implants [54]

Тип импланта	Потребляемая мощность, мкВт
Сердечный ритмоводитель	30—100
Сердечный дефибриллятор	30—100
Нейро-ритмоводитель	30—~1000
Насос для подачи медикаментов	100—2000
Кохлеарный имплант	10000

использования. Одно из теоретически возможных решений заключается в размещении коллекторов с большой площадью поверхности в непосредственной близости от источников излучения. Антенные фермы могут собирать достаточно энергии для получения полезной мощности от паразитных радиоволн, что стало возможным благодаря модулям со сверхнизким входным напряжением [59]. Заметим, однако, что антенны должны быть расположены в дальнопольной зоне излучения — в ближнем поле они просто будут «отсасывать» энергию из источника.

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) состоят из двух спаев разнородных материалов, между которыми существует тепловой градиент. ТермоЭДС обычно не превышает от 100 до 200 мкВ/К на каждый спай [60]. Соответствующая выходная мощность достигается путем последовательного/параллельного соединения нескольких спаев. Разрабатываются устройства на основе ТЭГ, занимающие все меньшую площадь [61]. В перспективе просматривается разработка материалов, способных работать в более высоких температурных градиентах и хорошо проводить электричество, не проводя при этом тепло, что повышает эффективность и применимость к теплочувствительным объектам, таким как человеческое тело.

Пироэлектрические наногенераторы. Изменение спонтанной поляризации материала при колебаниях температуры приводит к появлению разноименных зарядов на противоположных концах пироэлектрического кристалла — пироэлектрическому (**ПиЭ**) эффекту. Это явление характерно для анизотропных диэлектрических кристаллов с определенной симметрией. Его можно наблюдать в монокристаллах, керамиках, композитах, неорганических пленках, органических материалах и полимерах. Пироэлектрические материалы обязательно являются также пьезоэлектриками. Пироэлектрические наногенераторы состоят из трех частей: нижнего металлического электрода, среднего слоя из ПиЭ материала и верхнего электрода, подключенного к источнику тепла [62]. Пироэлектрический эффект традиционно используется для изготовления чувствительных детекторов инфракрасного излучения, датчиков ударных волн, а также точных измерителей вариации напряжения и температуры. Недавно также был выявлен потенциал ПиЭ эффекта для сбора тепловой энергии [63].

Биомеханические источники. Часть механической и тепловой энергии, вырабатываемой человеческим телом, может быть собрана [60]. Ремешок вокруг колена может вырабатывать около 2,5 Вт, что достаточно для питания, например, сотового телефона [64]. Можно использовать даже такие сверхслабые источники энергии, как дыхание че-

ловека, приводящее в движение миниветряк, или вибрации голосового аппарата [60].

Трибоэлектрические наногенераторы (ТЭНГ) могут преобразовывать механическую энергию, присутствующую в окружающей среде, в электрическую за счет сочетания эффектов контактной электризации и электростатической индукции. В последнее время удалось увеличить выходной электрический ток ТЭНГ с \sim нА до \sim мкА и даже \sim мА, перейдя от переменного тока к постоянному, а плотность мощности возросла с \sim мВт/м² до \sim Вт/м². Полупроводниковые ТЭНГ постоянного тока появились в поле зрения исследователей, чтобы адаптироваться к тенденции миниатюризации современных полупроводниковых электронных устройств и интеграции с ними. Они более подходят для этих целей, чем традиционные полимерные ТЭНГ [65—67].

Бета-вольтаические генераторы. Преимуществами источников питания на основе радиоактивных изотопов являются длительный срок службы, малая масса, небольшие размеры, широкий диапазон рабочих температур и высокий уровень надежности. Еще одним из преимуществ использования бета-вольтаических элементов в полупроводниковых MEMS-устройствах является совместимость технологических процессов производства. Это позволяет создавать конечное устройство за один технологический цикл [68].

Магнитоэлектрические и гибридные устройства. Прямой магнитоэлектрический эффект (**ПМЭЭ**) заключается в возникновении электрической поляризации в материале, подвергнутом воздействию магнитного поля. Этот эффект гораздо сильнее выражен в композитных материалах, чем в однофазных (т. е. мультиферроиках), поэтому только первые нашли применение в СРЭ. Композитные МЭ материалы содержат как пьезоэлектрические (**ПЭ**), так и магнитоэлектрические (**МС**) материалы. Механизм прямого МЭЭ заключается в следующем: МС компонент деформируется за счет магнитоэлектрики в приложенном магнитном поле. Часть этого растяжения/сжатия затем передается ПЭ компоненту, что приводит к индукции в нем макроскопической электрической поляризации за счет ПЭ эффекта. Сбор энергии рассеянных переменных магнитных полей с помощью МЭЭ можно комбинировать с другими механизмами сбора энергии, такими как ПЭ механизм [69].

Другим примером гибридных устройств могут служить *электромагнитно-трибоэлектрические генераторы*, преобразующие энергию механического движения в электрическую [70].

Встраиваемые системы становятся все более распространенными в нашей повседневной жизни. Программируемые микрочипы, лежащие в основе бытовых приборов, компьютеров и систем безопас-

ности, могут питаться, по крайней мере частично, от систем СРЭ вместо батарей или суперконденсаторов [60].

Интересные разработки ведутся и в других областях, например, в биологии. Еще в 2008 г. исследователи из Массачусетского технологического института (MIT) изучали разность потенциалов между растениями и окружающей их почвой [71]. Другие исследователи из MIT поместили крошечный газотурбинный двигатель в кремниевый чип размером с монетку. Полученное устройство может работать в 10 раз дольше, чем батарея той же массы, питающая ноутбуки, сотовые телефоны, радиоприемники и другие электронные устройства [72]. Исследователи DARPA предложили даже термоядерные реакторы размером с чип [73].

Главное свойство будущего — его непредсказуемость, поэтому не известно, какая именно технология сбора энергии завоюет рынок, но исследования, направленные на преодоление ограничений обычных батарей, активно набирают обороты.

Заключение

Таким образом, впервые в своей истории человечество столкнулось с необходимостью ограничить использование самых эффективных источников энергии — ископаемого топлива. На изменение климата (глобальное потепление) влияет не про-

изводимая энергия (пока невозможно напрямую нагревать окружающую среду), а сопутствующий парниковый эффект, вызванный выбросами парниковых газов. Отметим, что не все страны готовы платить более высокую цену за энергию из альтернативных (возобновляемых) источников, прежде всего потому, что испытывают острую нехватку энергии как таковой.

Из технологий, рассмотренных П.Л. Капицей в 1975 г. [1], атомная энергетика сохранила и укрепила свои позиции во все большем числе стран, несмотря на то, что в некоторых других странах против нее в течение многих лет велась активная борьба. Сомнения П.Л. Капицы относительно экономической эффективности солнечной энергетике были разрешены снижением цен на солнечные батареи. Многие другие альтернативные технологии, как и предвидел Капица, не вышли за рамки нишевых применений. Кроме того, в последнее десятилетие активно разрабатываются методы сбора рассеянной энергии, но здесь речь идет о низких и сверхнизких мощностях.

С точки зрения энергопотребления на первый план выходят электроника и телекоммуникации. Во всем мире ведется активный поиск новых парадигм, таких как нейроморфные вычисления, аттоваттная оптоэлектроника и т. д., которые позволяют обеспечить технологический прогресс без увеличения потребления энергии.

Библиографический список / References

1. Капица П.Л. Энергия и физика. Успехи физических наук. 1976; 118(2): 307—314. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0118.197602e.0307>
2. Kapitza P.L. Energy and physics. *Physics—Uspekhi*. 1976; 19(2): 169—173. <https://doi.org/10.1070/PU1976v-019n02ABEH005135>
3. What is renewable energy? <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy> (accessed on 10.04.2024).
4. Palazzo Corner S., Siegert M., Ceppi P., Fox-Kemper B., Frölicher T.L., Gallego-Sala A., Haigh J., Hegerl G.C., Jones C.D., Knutti R., Koven Ch.D., MacDougall A.H., Meinshausen M., Nicholls Z., Sallée J.B., Sanderson B.M., Séférian R., Turetsky M., Williams R.G., Zaehle S., Rogelj J. The zero emissions commitment and climate stabilization. *Frontiers in Science*. 2023; 1: 1170744. <https://doi.org/10.3389/fsci.2023.1170744>
5. Fuel Properties Comparison. Alternative Fuels Data Center. <https://afdc.energy.gov/fuels/properties> (accessed on 10.04.2024).
6. Electric car battery weight explained. <https://blog.evbox.com/ev-battery-weight> (accessed on 10.04.2024).
7. Morante J.R. The role of materials research in the deployment of hydrogen. *Inside E-MRS World*. 2022; 1(2). https://www.dropbox.com/s/5299cuybpbk6odct/Inside%20E-MRS%20World_V1N2_September2022.pdf?dl=0 (accessed on 10.04.2024).
8. Pérez L.A.G. Heat pump vs boiler comparison guide. 2024. <https://www.boilerguide.co.uk/compare/types/boiler-vs-heat-pump> (accessed on 10.04.2024).
9. Tollefson J. Is it too late to keep global warming below 1.5 °C? The challenge in 7 charts. November 21, 2023. https://www.nature.com/immersive/d41586-023-03601-6/index.html?utm_source=Live+Audience&utm_campaign=7d1b6828a6-briefing-dy-20231122&utm_medium=email&utm_term=0_b27a691814-7d1b6828a6-51854944 (accessed on 10.04.2024).
10. 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050. May 16, 2018. UN Department of Economic and Social Affairs. <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html> (accessed on 10.04.2024).
11. G20 energy transitions ministers' meeting. Goa, India, July 22, 2023. Outcome document and chair's summary. <http://www.g20.utoronto.ca/2023/230722-energy.html> (accessed on 10.04.2024).
12. COP28 UAE. <https://www.cop28.com/> (accessed on 10.04.2024).
13. Ritchie H. How have the world's energy sources changed over the last two centuries? December 1, 2021. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/global-energy-200-years> (accessed on 10.04.2024).
14. Bryce E. How many calories can the brain burn by thinking? November 9, 2019. <https://www.livescience.com/burn-calories-brain.html> (accessed on 10.04.2024).

14. Baumann O. How much energy do we expend using our brains? April 27, 2023. <https://bond.edu.au/news/how-much-energy-do-we-expend-using-our-brains> (accessed on 10.04.2024).
15. Thompson N.C., Ge S., Manso G.F. The importance of (exponentially more) computing power. arXiv:2206.14007. <https://arxiv.org/abs/2206.14007>
16. Mehonic A., Kenyon A.J. Brain-inspired computing needs a master plan. *Nature*. 2022;604:255. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04362-w>
17. Amodè D., Hernandez D. AI and compute. May 16, 2018. OpenAI Blog. <https://openai.com/blog/ai-and-compute/> (accessed on 10.04.2024).
18. Huestis S. Cryptocurrency's energy consumption problem. January 30, 2023. ARMI. <https://rmi.org/cryptocurrencys-energy-consumption-problem/> (accessed on 10.04.2024)
19. Trends in electric light-duty vehicles. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-electric-light-duty-vehicles> (accessed on 10.04.2024).
20. de Vries A. Bitcoin's growing water footprint. *Cell Reports Sustainability*. 2024; 1(1): 100004. <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2023.100004>
21. Suberg W. China controls 50% of bitcoin mining while US hits 14% – New survey. July 17, 2020. Cointelegraph. <https://cointelegraph.com/news/china-controls-50-of-bitcoin-mining-while-us-hits-14-new-survey> (accessed on 10.04.2024).
22. Huang R. After China's bitcoin mining ban, bitcoin is stronger than ever. October 31, 2023. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/digital-assets/2023/10/31/after-chinas-bitcoin-mining-ban-bitcoin-is-stronger-than-ever/?sh=2586cbca2399> (accessed on 10.04.2024).
23. What is the energy consumption of the internet? April 20, 2023. Thunder Said Energy. <https://thundersaid-energy.com/2023/04/20/what-is-the-energy-consumption-of-the-internet/> (accessed on 10.04.2024).
24. Belady C.L. In the data center, power and cooling costs more than the it equipment it supports. January 2007. *Electronics Cooling*. <https://www.electronics-cooling.com/2007/02/in-the-data-center-power-and-cooling-costs-more-than-the-it-equipment-it-supports/> (accessed on 10.04.2024).
25. Heyman K. The uncertain future of in-memory compute. December 13, 2023. *Semiconductor Engineering*. <https://semiengineering.com/the-uncertain-future-of-in-memory-compute/?cmid=99c53822-8131-4051-97ba-a5a0f8c0d417> (accessed on 10.04.2024).
26. Aschenbrenner L. Situational awareness. The decade ahead. June 2024. <https://situational-awareness.ai/> (accessed on 06.04.2024).
27. Miller D.A.B. Attojoule optoelectronics for low-energy information processing and communications. *Journal of Lightwave Technology*. 2017; 35(3): 346—396. <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2647779>
28. Nuclear Energy Summit 2024. Belgium, Brussels, March 21, 2024. <https://www.iaea.org/events/nuclear-energy-summit-2024> (accessed on 10.04.2024).
29. Lindley B., Roulstone T., Locatelli G., Rooney M. Can fusion energy be cost-competitive and commercially viable? An analysis of magnetically confined reactors. *Energy Policy*. 2023; 177: 113511. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113511>
30. Liu X., Ting J., He Y., Mercy M., Fiagbenu A., Zheng J., Wang D., Frost J., Musavigharavi P., Esteves G., Kisslinger K., Anantharaman S.B., Stach E., Olsson III R.H., Jariwala D. Reconfigurable compute-in-memory on field-programmable ferroelectric diodes. *Nano Letters*. 2022; 22(18): 7690—7698. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c03169>
31. Ellis G., Gelman S.E. A preliminary model of global subsurface natural hydrogen resource potential. *Geological Society of America Abstracts with Programs*. 2022; 54(5). <https://doi.org/10.1130/abs/2022AM-380270>
32. Li Z., Fang S., Sun H., Chung R.-J., Fang X., He J.-H. Solar hydrogen. *Advanced Energy Materials*. 2023; 13(8): 2203019. <https://doi.org/10.1002/aenm.202203019>
33. Crownhart C. Solar panels are a pain to recycle. These companies are trying to fix that. August 19, 2021. <https://www.technologyreview.com/2021/08/19/1032215/solar-panels-recycling/> (accessed on 10.04.2024).
34. Cheung A. Get a grip, unleash, lock in: An energy transition to-do list for 2024. January 16, 2024. Boombeg-NEF. <https://about.bnef.com/blog/get-a-grip-unleash-lock-in-an-energy-transition-to-do-list-for-2024/> (accessed on 10.04.2024).
35. Global glut turns solar panels into garden fencing option. April 2, 2024. Financial Times. <https://www.ft.com/content/2ea6bf6d-04e9-453b-a35f-cd6431cfc7bf> (accessed on 10.04.2024).
36. Solar PV. July 11, 2023. <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv> (accessed on 10.04.2024).
37. Williams M. New satellite successfully beams power from space. June 5, 2023. Universe Today. https://www.universetoday.com/161759/new-satellite-successfully-beams-power-from-space/#google_vignette (accessed on 10.04.2024).
38. Osman A.I., Chen L., Yang M., Msigwa G., Farghali M., Fawzy S., Rooney D.W., Yap P.-S. Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2023; 21: 741–764. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8>
39. Schneider N. New photovoltaic materials: going beyond silicon. February 16, 2022. *Polytechnique Insights*. <https://www.polytechnique-insights.com/en/braincamps/industry/how-new-materials-are-transforming-industry/new-photovoltaic-materials-going-beyond-silicon/> (accessed on 10.04.2024)
40. Williams M. Scientists beam solar power from space to earth in world first. June 6, 2023. *Science Alert*. <https://www.sciencealert.com/scientists-beam-solar-power-from-space-to-earth-in-world-first> (accessed on 10.04.2024).
41. New study updates NASA on space-based solar power. January 11, 2024. *National Aeronautics and Space Administration*. <https://www.nasa.gov/organizations/otps/space-based-solar-power-report/> (accessed on 10.04.2024).
42. Modha D.S., Akopyan F., Andreopoulos A., Appuswamy R., Arthur J.V., Cassidy A.S., Datta P., DeBole M.V., Esser S.K., Otero C.O., Sawada J., Taba B., Amir A., Bablani D., Carlson P.J., Flickner M.D., Gandhasri R., Garreau G.J., Ito M., Klamo J.L., Kusnitz J.A., McClatchey N.J., McKinstry J.L., Nakamura Yu., Nayak T.K., Risk W.P., Schleupen K., Shaw B., Sivagnaname J., Smith D.F., Terrizzano I., Ueda T. Neural inference at the frontier of energy, space, and time. *Science*. 2023; 382(6668): 329—335. <https://doi.org/10.1126/science.adh1174>
43. Wolf S.A., Awschalom D.D., Buhrman R.A., Daughton J.M., von Molnar S., Roukes M.L., Chtchelkano-

- va A.Y., Treger D.M. Spintronics: a spin-based electronics vision for the future. *Science*. 2001; 294(5546): 1488—1495. <https://doi.org/10.1126/science.1065389>
44. Christensen D.V., Dittmann R., Linares-Barranco B., Sebastian A., Le Gallo M., Redaelli A., Slesazek S., Mikolajick T., Spiga S., Menzel S., Valov I., Milano G., Ricciardi C., Liang Sh.-J., Miao F., Lanza M., Quill T.J., Keene S.T., Salleo A., Grollier J., Marković D., Mizrahi A., Yao P., Yang J.J., Indiveri G., Strachan J.P., Datta S., Vianello E., Valentian A., Feldmann J., Li X., Pernice W.H.P., Bhaskaran H., Furber S., Neftci E., Scherr F., Maass W., Ramaswamy S., Tapson J., Panda P., Kim Y., Tanaka G., Thorpe S., Bartolozzi Ch., Cleland Th.A., Posch Ch., Liu Sh.Ch., Panuccio G., Mahmud M., Mazumder A.N., Hosseini M., Mohsenin T., Donati E., Tolu S., Galeazzi R., Christensen M.E., Holm S., Ielmini D., Pryds N. 2022 roadmap on neuromorphic computing and engineering. *Neuromorphic Computing and Engineering*. 2022; 2: 022501. <https://doi.org/10.1088/2634-4386/ac4a83>
45. Roldan J.B., Maldonado D., Aguilera-Pedregosa C., Moreno E., Aguirre F., Romero-Zaliz R., Garcia-Vico A.M., Shen Y., Lanza M. Spiking neural networks based on two-dimensional materials. *npj 2D Materials and Applications*. 2022; 6: 63. <https://doi.org/10.1038/s41699-022-00341-5>
46. Ledentsov N.N., Grundmann M., Heinrichsdorff F., Bimberg D., Ustinov V.M., Zhukov A.E., Maximov M.V., Alferov Z.I., Lott J.A. Quantum-dot heterostructure lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2000; 6(3): 439. <https://doi.org/10.1109/2944.865099>
47. Krishnamourthy H.S. Power converters with edge intelligence: Toward greener, resilient, and sustainable energy systems. *Tech Briefs*. 2023; 47(11): 14. <https://www.techbriefs.com/documents/issue-archive/9175-ntb-1123/file>
48. U.S. National Science Foundation. Award Abstract # 2239966. CAREER: Enhancing the state of health and performance of electronics via in-situ monitoring and prediction (SHaPE-MaP) – Toward edge intelligence in power conversion. https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=2239966&HistoricalAwards=false (accessed on 10.04.2024).
49. What are Power Electronic Devices? Solar Power Electronic Devices. 2020. <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-power-electronic-devices> (accessed on 10.04.2024).
50. Agrivoltaics. <https://en.wikipedia.org/wiki/Agrivoltaics> (accessed on 10.04.2024).
51. Chatterjee A., Lobato C.N., Zhang H., Bergne A., Esposito V., Yun S., Insinga A.R., Christensen D.V., Imbaquingo C., Bjørk R., Ahmed H., Ahmad M., Ho Ch.Y., Madsen M., Chen J., Norby P., Chiabrera F.M., Gunkel F., Ouyang Z., Pryds N. Powering internet-of-things from ambient energy: a review. *Journal of Physics: Energy*. 2023; 5(2): 022001. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/acb5e6>
52. Energy harvesting. Semiconductor Engineering. https://semiengineering.com/kc/knowledge_center/energy-harvesting/165 (accessed on 10.04.2024).
53. Koon J. Energy harvesting starting to gain traction. April 18, 2022. Semiconductor Engineering. <https://semiengineering.com/energy-harvesting-starting-to-gain-traction/?cmid=424419b7-6c4a-46ab-bd26-c060ae4d86d4> (accessed on 10.04.2024).
54. Whalen S.A., Aplett C.A., Aselage T.L. Improving power density and efficiency of miniature radioisotopic thermoelectric generators. *Journal of Power Sources*. 2008; 180(1): 657—663. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.01.080>
55. Deng H., Xiao S., Yang A., Wu H., Tang J., Zhang X., Li Y. Advances in nanogenerators for electrical power system state sensing and monitoring. *Nano Energy*. 2023; 115: 108738. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108738>
56. Basset P., Beeby S.P., Bowen C., Chew Z.J., Delbani A., Dharmasena R.D.I.G., Dudem B., Fan F.R., Galayko D., Guo H., Hao J., Hou Y., Hu Ch., Jing Q., Jung H.Y., Karan S.K., Kar-Narayan S., Kim M., Kim S.-W., Kuang Y., Lee K.J., Li J., Li Zh., Long Y., Priya Sh., Pu X., Ruan T., Silva S.R.P., Wang H.S.; Wang K., Wang X., Wang Zh.L., Wu W., Xu W., Zhang H., Zhang Y., Zhu M. Roadmap on nanogenerators and piezotronics featured. *APL Materials*. 2022; 10(10): 109201. <https://doi.org/10.1063/5.0085850>
57. Kumar A., Ansari M.N.M., Ibrahim S.M., Thomas P., Vaish R. Functionally graded piezoelectric energy harvester: A numerical study. *Electronics*. 2022; 11(16): 2595. <https://doi.org/10.3390/electronics11162595>
58. Bai Y. Exploring challenges and potential for a commercially viable piezoelectric energy harvesting system – Can Energy-as-Data concept thrive? *Applied Physics Letters*. 2024; 124(1): 110502. <https://doi.org/10.1063/5.0193134>
59. Ibrahim H.H., Singh M.J., Al-Bawri S.S., Ibrahim S.K., Islam M.T., Alzamil A., Islam M.S. Radio frequency energy harvesting technologies: A comprehensive review on designing, methodologies, and potential applications. *Sensors (Basel)*. 2022; 22(11): 4144. <https://doi.org/10.3390/s22114144>
60. Worthman E. Micro-power energy harvesting. April 7, 2014. *Semiconductor Engineering*. <https://semiengineering.com/micro-power-energy-harvesting/> (accessed on 10.04.2024).
61. Tohidi F., Holagh S.G., Chitsaz A. Thermoelectric generators: A comprehensive review of characteristics and applications. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 201(Pt A): 117793. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117793>
62. Korkmaz S., Kariper I.A. Pyroelectric nanogenerators (PyNGs) in converting thermal energy into electrical energy: Fundamentals and current status. *Nano Energy*. 2021; 84: 105888. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105888>
63. Mondal R., Hasan M.A.M., Baik J.M., Yang Y. Advanced pyroelectric materials for energy harvesting and sensing applications. *Materials Today*. 2023; 66: 273—301. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2023.03.023>
64. Donelan J.M., Li Q., Naing V., Hoffer J.A., Weber D.J., Kuo A.D. Biomechanical energy harvesting: generating electricity during walking with minimal user effort. *Science*. 2008; 319(5864): 807—810. <https://doi.org/10.1126/science.1149860>
65. Choi D., Lee Y., Lin Z.-H., Cho S., Kim M., Ao C.K., Soh S., Sohn C., Jeong C.K., Lee J., Lee M., Lee S., Ryu J., Parashar P., Cho Y., Ahn J., Kim I.-D., Jiang F., Lee P.S., Khandelwal G., Kim S.-J., Kim H.S., Song H.-Ch., Kim M., Nah J., Kim W., Menge H.G., Park Y.T., Xu W., Hao J., Park H., Lee J.-H., Lee D.-M., Kim S.-W., Park J.Y., Zhang H., Zi Y., Guo R., Cheng J., Yang Z., Xie Y., Lee S., Chung J., Oh I.-K., Kim J.-S., Cheng T., Gao Q., Cheng G., Gu G., Shim M., Jung J., Yun Ch., Zhang Ch., Liu G., Chen Y., Kim S., Chen X., Hu J., Pu X., Guo Z.H., Wang X., Chen J., Xiao X., Xie X., Jarin M., Zhang H., Lai Y.-Ch., He T., Kim H., Park I., Ahn J., Huynh N.D., Yang Y., Wang Zh.L., Baik J.M., Choi D. Recent advances in triboelectric nanogenerators: From

technological progress to commercial applications. *ACS Nano*. 2023; 17(12): 11087—11219. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c12458>

66. Zhang R., Hummelgård M., Örtengren J., Andersson H., Olsen M., Chen D., Li J., Eivazi A., Dahlström C., Norgren M., Wang Z.L. Triboelectric nanogenerators with ultrahigh current density enhanced by hydrogen bonding between nylon and graphene oxide. *Nano Energy*. 2023; 115: 108737. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108737>

67. Shao Y., Luo B., Liu T., Cai C., Meng X., Wang S., Nie S. Harvesting energy from extreme environmental conditions with cellulosic triboelectric materials. *Materials Today*. 2023; 66: 348—370. <https://doi.org/10.1016/j.mat-tod.2023.04.006>

68. Bykov A.S., Malinkovich M.D., Kubasov I.V., Kisljuk A.M., Kiselev D.A., Ksenich S.V., Zhukov R.N., Temirov A.A., Chichkov M.V., Polisan A.A., Parkhomenko Yu.N. Application of radioactive isotopes for beta-voltaic generators. *Russian Microelectronics*. 2017; 46: 527. <https://doi.org/10.1134/S1063739717080054>

69. Vidal J.V., Turutin A.V., Kubasov I.V., Kisljuk A.M., Kiselev D.A., Malinkovich M.D., Parkhomenko Y.N., Kob-

eleva S.P., Sobolev N.A., Kholkin A.L. Dual vibration and magnetic energy harvesting with bidomain LiNbO₃-based composite. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2020; 67(6): 1219—1229. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2020.2967842>

70. Vidal J.V., Slabov V., Kholkin A.L., dos Santos M.P.S. Hybrid triboelectric-electromagnetic nanogenerators for mechanical energy harvesting: A review. *Nano-Micro Letters*. 2021; 13: 199. <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00713-4>

71. Love C.J., Zhang S., Mershin A. Source of sustained voltage difference between the xylem of a potted *Ficus benjamina* tree and its soil. *PLoS ONE*. 2008; 3(8): e2963. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002963>

72. Stauffer N.W. Engine on a chip promises to best the battery. September 15, 2006. *MIT Energy Initiative*. <https://energy.mit.edu/news/engine-on-a-chip-promises-to-best-the-battery/> (accessed on 10.04.2024).

73. Hambling D. Darpa's handheld nuclear fusion reactor. July 6, 2009. *WIRED*. <https://www.wired.com/2009/07/darpas-handheld-nuclear-fusion-reactor/> (accessed on 10.04.2024).

Информация об авторе / Information about the author

Соболев Николай Андреевич — доктор естественных наук, профессор, департамент физики и i3N, Университет Авейру, Кампус Сантьяго, 3810–193 Авейро, Португалия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9420-8130>; e-mail: niksob@gmail.com

Nikolai A. Sobolev — PhD, Professor Jubilado, Department of Physics and i3N, Universidade de Aveiro, Campus Santiago, 3810–193 Aveiro, Portugal; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9420-8130>; e-mail: niksob@gmail.com

Поступила в редакцию 27.05.2024; поступила после доработки 27.06.2024; принята к публикации 30.06.2024
Received 27 May 2024; Revised 27 June 2024; Accepted 30 June 2024

* * *