



**А Р В Э**

АССОЦИАЦИЯ РАЗВИТИЯ  
ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

# РАЗВИТИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В РОССИИ И МИРЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ 2024



ВВЕДЕНИЕ	3
СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ ГЛОБАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	4
РЫНОК СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ	12
Мировые производственные мощности по выпуску солнечных модулей	15
Основные мировые производители солнечных модулей	15
Мировой рынок солнечных модулей	16
Динамика цен на солнечные модули	17
Развитие солнечной фотоэлектрической энергетики в России	18
РЫНОК КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПЛАСТИН	22
Мировые производственные мощности по выпуску солнечных пластин	25
Мировой рынок солнечных пластин	26
Динамика цен на солнечные пластины	27
Производство солнечных пластин в России	27
РЫНОК ПОЛИКРЕМНИЯ	30
Мировые производственные мощности по выпуску поликремния	32
Мировые производители поликремния	33
Динамика цен на поликремний	37
Материалоемкость элементов солнечных электростанций	37
Рынок поликремния в России	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	43
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	46
ПРИЛОЖЕНИЯ	47



Сформированные тренды развития технологий энергоперехода свидетельствуют о том, что глобальная отрасль возобновляемой энергетики демонстрирует наиболее активное развитие. Мировые вводы генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии (далее — ВИЭ), ежегодно опережают прирост энерго мощностей традиционной генерации и демонстрируют рекордные темпы роста.

За последние 10 лет солнечная генерация стала основной технологией энергоперехода в мире. Этому способствовали рекордный рост объемов ввода солнечных электростанций (далее — СЭС), рекордные объемы инвестиций, темпы снижения стоимости и повышения эффективности технологий в данном секторе.

По итогам 2023 года установленная мощность солнечных электростанций в мире достигла 1,4 ТВт, увеличившись в 10 раз за последнее десятилетие. Только в 2023 году в мире было введено в эксплуатацию 420 ГВт СЭС (годовой прирост к 2022 году — 85%). В 2024 году рекорд будет вновь побит, и вводы СЭС превысят 500 ГВт. Далее объемы вводов скорее всего продолжат расти, хотя, возможно, и менее существенными темпами.

Лидерские позиции в глобальном развитии солнечной энергетики уже на протяжении нескольких лет принадлежат Китаю. По итогам 2023 года на эту страну приходится 43% всех солнечных энерго мощностей мира. Также в пятерку стран-лидеров по объемам установленной мощности СЭС входят США, Япония, Германия и Индия.

Страны ставят перед собой амбициозные цели по декарбонизации национальных экономик, и зачастую важная роль в этом процессе отводится солнечной энергетике. Поскольку тренд развития технологий солнечной генерации будет и дальше способствовать росту сектора во всем мире, ряд стран уже принимает меры, направленные на активную реализацию проектов солнечной энергетики.

Наибольшее распространение в мире получили солнечные электростанции, которые основаны на фотоэлектрическом преобразовании энергии и использовании солнечных фотоэлектрических модулей, изготовленных из кристаллического кремния.

В соответствии с целью, обозначенной на прошедшей в 2023 году Конференции сторон по изменению климата, глобальная установленная мощность СЭС должна достичь 5,4 ТВт к 2030 году, что соответствует почти половине всей установленной мощности ВИЭ, необходимой к данному

сроку. Это означает, что среднегодовой прирост солнечных энерго мощностей будет составлять около 578 ГВт. В то же время при подобном сценарии развития спрос на поликристаллический кремний — ключевое сырье в производстве фотоэлектрических модулей — не превысит 2 млн т к 2030 году.

Для оценки возможности удовлетворения обозначенного спроса необходимо учитывать ряд факторов, в числе которых наличие достаточных производственных мощностей по всей цепочке производства компонентов солнечных фотоэлектрических станций, а также достаточный объем ключевых сырьевых материалов, используемых в производственной цепочке.

В настоящее время доминирующая роль по всей цепочке поставок для фотоэлектрической промышленности принадлежит Китайской Народной Республике, на которую приходится 80–98% всех мировых производственных мощностей в зависимости от этапа производства — поликристаллический кремний, кремниевые пластины, солнечные элементы и солнечные модули. Столь высокий уровень концентрации производств на территории одной страны вызывает опасения других стран, нацеленных на развитие солнечной энергетики, в части зависимости от импорта ключевых компонентов из Китая и влияния его политики на мировые цены продукции.

При изучении данных вопросов важно рассмотреть, какой спрос формируют страны за пределами Китая, как они борются с риском указанной зависимости и какие протекционистские меры предпринимают в целях диверсификации цепочки поставок для фотоэлектрической промышленности.

Другим важным аспектом являются звучащие иногда сомнения в отношении риска возникновения в среднесрочной перспективе дефицита ключевого сырья, требуемого для строительства солнечных электростанций (помимо поликремния, к ним относятся алюминий, медь, серебро, полимеры, стекло, сталь, бетон и др.). Для оценки уровня достаточности материалов целесообразно оценить, какие тенденции развития материалоемкости формируются в мире и как это влияет на спрос.

В рамках данного отчета проведен анализ указанных вопросов, что позволяет оценить сформировавшиеся в мире тренды в фотоэлектрической промышленности, а также определить роль России и потенциал для развития отечественного производства на различных этапах производства — от поликремния до фотоэлектрических модулей.

# 01

СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ  
ГЛОБАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ  
СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



Солнечная энергетика характеризуется наиболее быстрыми темпами развития среди всех направлений возобновляемой энергетики в мире. С 2013 по 2023 год установленная мощность солнечной генерации увеличилась в 10 раз. К концу 2023 года 37% совокупной глобальной установленной мощности объектов, функционирующих на основе ВИЭ, и около 15% установленной мощности всех электростанций мира были представлены солнечными электростанциями, что соответствует 1419 ГВт<sup>1</sup> (Рис. 1). Сейчас свыше 99% мощности солнечной энергетике приходится на солнечные электростанции, функционирующие на основе фотоэлектрического преобразования энергии (Solar photovoltaic power), и менее 1% — это СЭС, вырабатывающие электроэнергию за счет технологии концентрации солнечной энергии (Concentrated solar power, далее — CSP).

Объемы вводов солнечных фотоэлектрических станций (далее — СФЭС) ежегодно растут. В 2022 году солнечная фотоэлектрическая генерация стала единственной технологией, которая побила предыдущий рекорд по ежегодному объему вводов и обеспечила запуск в эксплуатацию 228 ГВт СФЭС, что на 35% больше, чем в 2021 году. В 2023 году рекорд был снова побит, и в мире были введены в эксплуатацию около 420 ГВт СФЭС, что на 85% больше, чем годом ранее<sup>2, 3</sup>. При этом еще в середине 2023 года Международное энергетическое агентство (МЭА) прогнозировало, что в 2023 и 2024 году в мире будут запущены около 290 ГВт и 310 ГВт солнечных фотоэлектрических станций соответственно<sup>4</sup>. По новым оценкам BloombergNEF (от марта 2024 года), вводы СФЭС по итогам 2024 года могут достичь 520 ГВт<sup>5</sup>.

На конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата COP28, прошедшей в 2023 году, поставлена цель по трехкратному росту глобальной установленной мощности ВИЭ к 2030 году до 11 тыс. ГВт, из которых на СЭС приходится 5,4 тыс. ГВт<sup>6</sup>. По оценкам МЭА, при нынешней политике и рыночных условиях глобальная мощность ВИЭ увеличится в 2,5 раза к 2030 году, однако с учетом данных о рекордных вводах ВИЭ в 2022-

2023 году (во многом благодаря ускоренному развитию солнечной фотоэлектрической энергетике) целевой показатель по утроению глобальной мощности является вполне достижимым<sup>7</sup>. На горизонте 2030–2050 годов, согласно прогнозу IRENA, для того чтобы оставаться на пути снижения температуры на 1,5°C (1.5°C Scenario), необходимо вводить в среднем 1 000 ГВт ВИЭ-генерации ежегодно, в том числе около 600 ГВт СФЭС<sup>8</sup>. По факту объемные показатели могут оказаться и выше, поскольку за последние 10 лет наблюдается ускорение темпов декарбонизации, и все планы по объемам инвестиций, по темпам снижения стоимости, повышения эффективности технологий, а также строительства объектов ВИЭ были перевыполнены.

Для утроения установленной мощности ВИЭ к 2030 году потребуются рост инвестиций в отрасль возобновляемой энергетики более чем в 2,5 раза по сравнению с 2022 годом — в среднем до 1 300 млрд долл. в год в период с 2023 по 2030 год. В сектор солнечной фотоэлектрической энергетике необходимы ежегодные инвестиции в объеме около 370 млрд долл. за аналогичный период. При этом за 2023 год инвестиции в солнечную энергетику достигли рекордных 480 млрд долл. США<sup>9</sup>. Соответственно, текущего уровня инвестиций в фотоэлектрическую энергетику достаточно относительно требуемого до конца десятилетия (Рис. 2).

Темпы развития солнечной генерации обусловлены появлением более эффективных технологий, снижением стоимости строительства данного типа электростанций и, как следствие, себестоимости производимой ими электроэнергии. С 2010 по 2022 год капитальные затраты на установку СФЭС в среднем по миру снизились на 83% — с 5124 долл. США/кВт в 2010 году до 876 долл. США/кВт в 2022 году. При этом, несмотря на рост капитальных затрат фотоэлектрических станций в ряде стран в 2022 году, среднемировые показатели средневзвешенной нормированной стоимости производства электроэнергии (LCOE, Levelized cost of electricity) фотоэлектрическими СЭС в течение 2022 года снизились на 3%<sup>10</sup>. Всего за период с 2010 по 2022 год LCOE для солнечных электростанций снизилась на 89% — до 0,049 долл. США/МВт·ч в 2022 году (Рис. 3).

1 IRENA (2024). Renewable capacity statistics 2024.

2 С учетом вывода из эксплуатации выработавшего парковый ресурс оборудования прирост солнечных фотоэлектрических энерго мощностей в 2023 году составил 346 ГВт. Всего в мире за 2023 год прирост энерго мощностей возобновляемой энергетики составил 473 ГВт.

3 IEA (2024). Clean Energy Market Monitor — March 2024.

4 IEA (2023). Renewable Energy Market Update.

5 BloombergNEF (2024). 1Q 2024 Global PV Market Outlook.

6 COP28, IRENA, GRA (2023). Tripling renewable power and doubling energy efficiency by 2030: Crucial steps towards 1.5 °C.

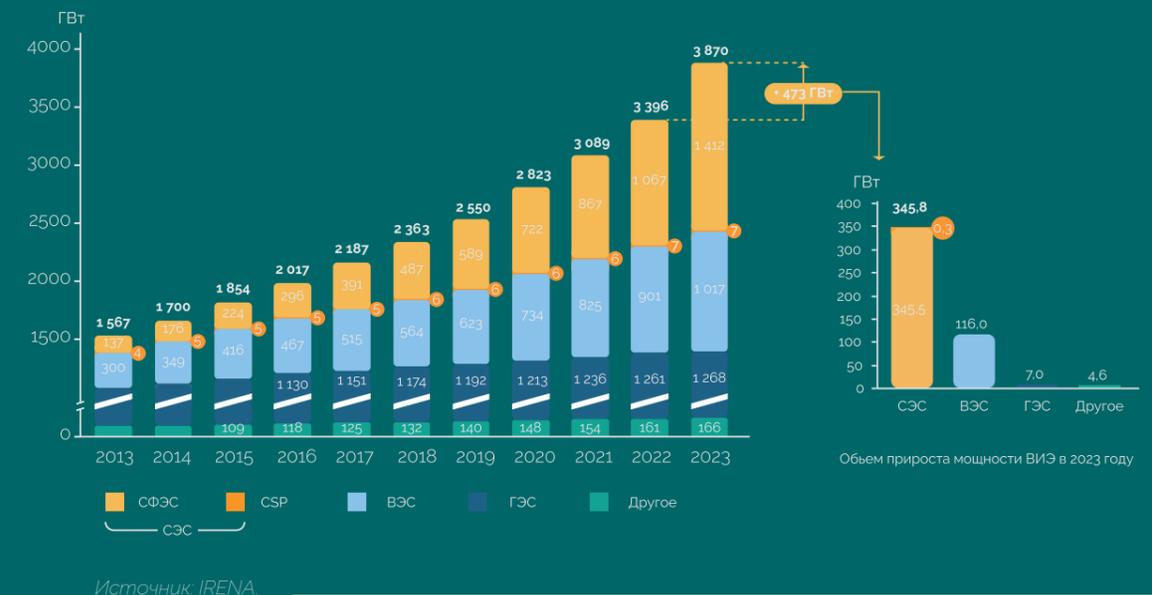
7 IEA (2024). Renewables 2023.

8 IRENA (2023). World Energy Transitions Outlook 2023.

9 IEA (2024). World Energy Investment 2024.

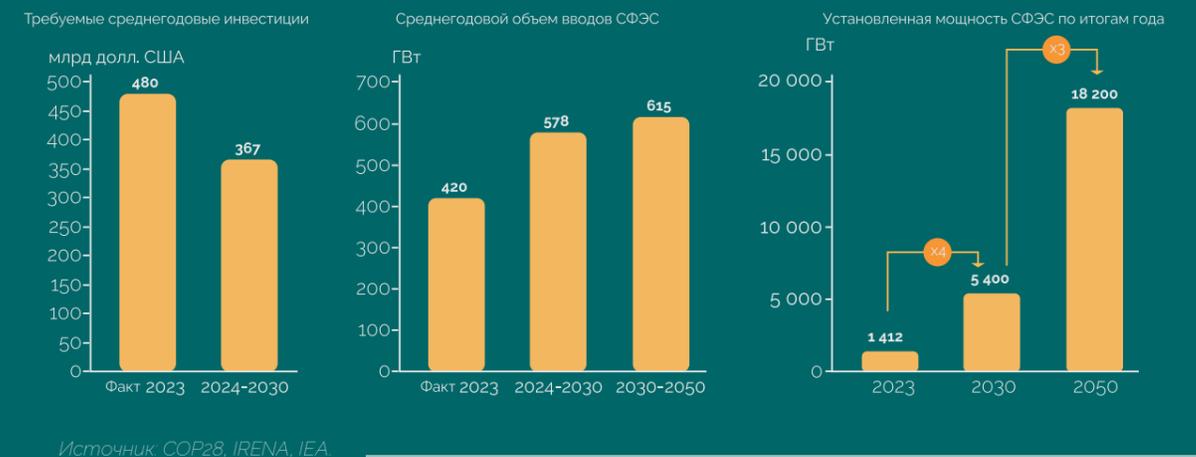
10 Незначительное общемировое снижение стоимости солнечной электроэнергии по сравнению с 2021 годом связано с тем, что в большинстве стран наблюдался рост капитальных затрат, обусловленный повышением цен на фотоэлектрические модули и сырьевые товары. При этом снижение вызвано только влиянием Китая, где капитальные затраты СЭС были ниже, чем на большинстве рынков, а его доля в глобальном объеме вводов увеличилась до 44% в 2022 году.

Рис. 1. Совокупная установленная мощность ВИЭ-генерации в мире и объем прироста энерго мощностей ВИЭ в 2023 году, ГВт



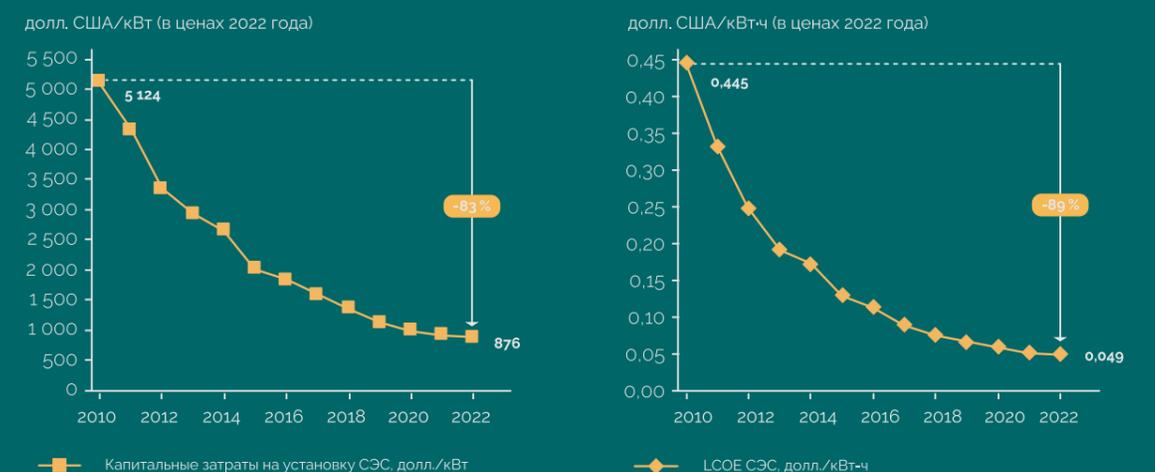
Источник: IRENA.

Рис. 2. Прогнозные показатели развития солнечной фотоэлектрической энергетике по сценарию 1,5 °C IRENA



Источник: COP28, IRENA, IEA.

Рис. 3. Динамика средних мировых показателей капитальных затрат и LCOE СФЭС (в ценах 2022 года)



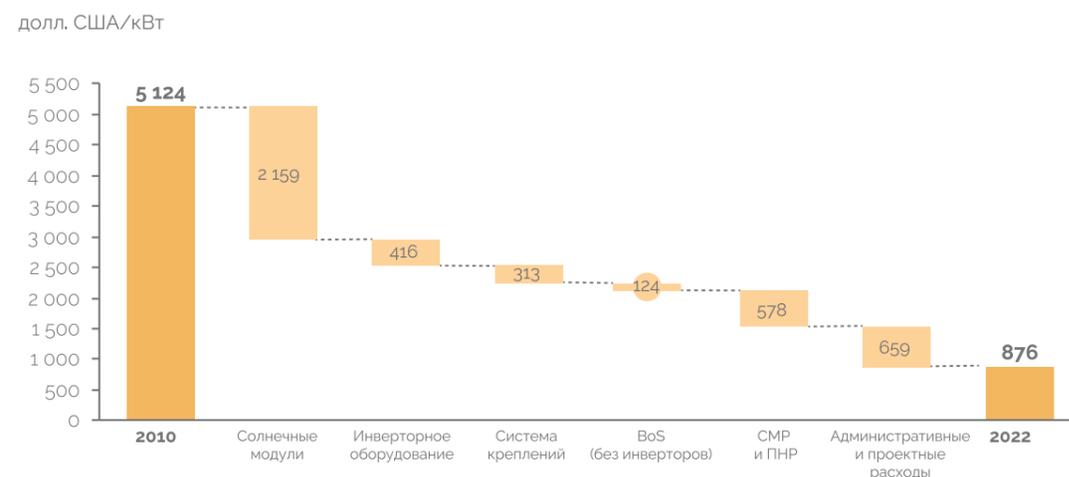
Источник: IRENA.

Значительную роль также сыграло снижение затрат на строительно-монтажные и пуско-наладочные работы (СМР и ПНР) по установке СФЭС. Вклад отдельных составляющих в общее среднмировое снижение капитальных затрат СФЭС за 13 лет представлен на **Рис. 4**<sup>11</sup>.

В долгосрочной перспективе можно ожидать, что повышение эффективности технологий, дальнейшая оптимизация производства и конструкторские инновации приведут к дополнительному

снижению капитальных затрат на строительство солнечных электростанций и стоимости производимой на них электроэнергии. Так, МЭА прогнозирует двукратное снижение LCOE СЭС к 2050 году — с 50 долл./МВт·ч в 2022 году до 25 долл./МВт·ч к 2050 году для США и Китая и с 65 долл./МВт·ч до 30 долл./МВт·ч для Евросоюза<sup>12</sup>. Рост эффективности солнечных модулей также связывают с развитием принципиально новых технологий<sup>13</sup>.

**Рис. 4. Факторы, повлиявшие на снижение капитальных затрат СФЭС в мире (в ценах 2022 года)**



Источник: IRENA.

11 IRENA (2023). Power Generation Cost 2022.

12 IEA (2023). World Energy Outlook 2023.

13 S&P Global (2023). Commodity Insights. The cost of renewables will continue to fall, this is why.

Сегодня сектор солнечной энергетики характеризуется наиболее быстрыми темпами развития среди всех направлений возобновляемой энергетики в мире и ежегодно ставит новые рекорды по глобальному объему вводов СФЭС (420 ГВт в 2023 году).

По итогам 2023 года установленная мощность солнечных фотоэлектрических станций в мире достигла 1,4 ТВт, увеличившись в 10 раз за последнее десятилетие.

Основными факторами роста рынка солнечной энергетики являются снижение стоимости строительства данного типа электростанций и уменьшение себестоимости производства солнечной электроэнергии, что, в свою очередь, обусловлено стремительным развитием технологий. С 2010 по 2022 год среднмировые показатели LCOE для СФЭС снизились на 89% — до 49 долл. США/МВт·ч.

Ожидается, что сектор солнечной энергетики в мире продолжит свой рост. Так, согласно сценарию IRENA по снижению температуры на 1,5°C (1.5°C Scenario), на горизонте до 2030 года среднегодовой прирост мощности СФЭС составит 578 ГВт, благодаря чему их совокупная установленная мощность может превысить 5,4 ТВт до конца десятилетия.

Для реализации данного прогноза потребуется около 370 млрд долл. ежегодных инвестиций. При этом только за 2023 год инвестиции в солнечную энергетику уже превысили 480 млрд долл. США.

В долгосрочной перспективе рост сектора также продолжится: развитие технологий будет способствовать снижению стоимости как строительства солнечных электростанций, так и производимой на них электроэнергии.



# КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

## Основное оборудование, устройство и принцип работы солнечной электростанции

Солнечная электростанция представляет собой инженерное сооружение, которое преобразует поток солнечного излучения в электрическую энергию.

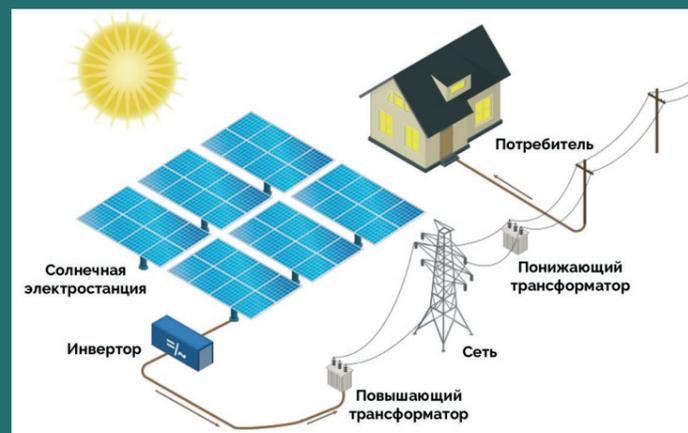
Основным генерирующим оборудованием фотоэлектрической солнечной станции являются фотоэлектрические солнечные модули (далее — ФЭМ), конструктивно объединяющие электрически соединенные между собой солнечные элементы (фотоэлектрические ячейки / преобразователи). Второй по важности элемент СФЭС — инверторное оборудование, преобразующее напряжение постоянного тока от солнечных модулей в переменный ток. Помимо этого, солнечная фотоэлектрическая станция состоит из опорных конструкций, системы креплений, кабельной продукции, в некоторых случаях — аккумуляторных батарей и пр.<sup>14</sup>

В зависимости от решаемых задач, СФЭС могут иметь различные конфигурации и, соответственно, состав оборудования. Наиболее распространенным типом являются сетевые фотоэлектрические солнечные станции, работающие параллельно с внешней сетью и позволяющие экономить потребление электроэнергии из нее (Рис. 5). В случае отсутствия источников внешнего электроснабжения, устанавливаются автономные солнечные электростанции, в которых предусмотрена система накопления энергии, позволяющая использовать излишки выработанной электроэнергии в необходимое время. Также возможно сооружение гибридной солнечной электростанции, сочетающей в себе элементы сетевой и автономной СФЭС.

Работа фотоэлектрического элемента по преобразованию энергии солнечного излучения в электрическую энергию основана на принципе фотоэффекта в полупроводниковых структурах с p-n переходами (Рис. 6).

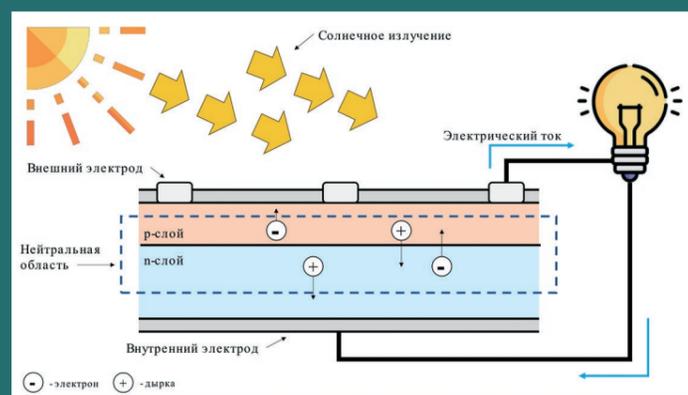
Полупроводниковый элемент состоит из кремниевых слоев двух типов — p-слоя и n-слоя. Полупроводник p-типа — это проводник с основным носителем заряда положительного типа или дырками, полупроводник

Рис. 5. Пример устройства сетевой солнечной электростанции



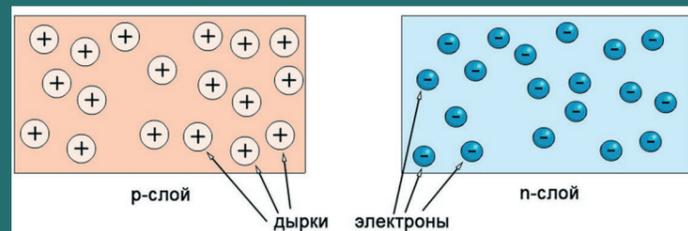
Источник: АРВЭ.

Рис. 6. Принцип работы фотоэлектрического элемента



Источник: АРВЭ.

Рис. 7. Схема p-n перехода



Источник: АРВЭ.

n-типа — это проводник с основными носителями заряда отрицательного типа или свободными электронами (Рис. 7).

На границе двух слоев образуется нейтральная область, по краям которой формируются положительно и отрицательно заряженные слои. Они создают внутри нейтральной области электрическое поле. При облучении полупроводникового элемента световым потоком в его нейтральной области происходит генерация электронно-дырочных пар, в результате чего концентрация электронов в n-слое и дырок в p-слое достигает высоких значений, достаточных для протекания постоянного тока через проводник, которым p-слой и n-слой соединены друг с другом. Токи каждого фотоэлектрического элемента в составе ФЭМ собираются через токопроводящие шины — сеткообразные линии на поверхности элемента, чтобы затем попасть в инвертор.

## Структура капитальных затрат солнечных электростанций

Основными составляющими капитальных затрат СФЭС являются затраты на фотоэлектрические модули и на баланс системы (BoS, Balance of System), которые включают в себя стоимость вспомогательного оборудования для обеспечения эксплуатации электростанции, а также затраты на строительные-монтажные работы.

По различным оценкам, основной составляющей в структуре затрат для крупномасштабных солнечных электростанций являются фотоэлектрические модули, на которые приходится около 34–37% общих затрат (Рис. 8)<sup>15, 16</sup>.

## Технологическая цепочка производства кристаллических модулей

Поскольку почти все глобальное производство солнечных модулей основано на использовании элементов из кристаллического кремния, дальнейшее рассмотрение этапов производства ФЭМ в рамках данного исследования проводится для кремниевых технологий<sup>17</sup>. Схема процесса производства кристаллических фотоэлектрических модулей и описание этапов производства представлены на Рис. 9 и Рис. 10<sup>18</sup>.

15 Fraunhofer ISE (2023). Photovoltaics Report.

16 IEA (2021). What is the impact of increasing commodity and energy prices on solar PV, wind and biofuels?

17 Классификация солнечных фотоэлектрических элементов, объединяемых в фотоэлектрическом модуле по технологиям производства, представлена в Табл. 1 Приложения 1.

18 IEA (2022). Solar PV Global Supply Chains.

Рис. 8. Структура капитальных затрат крупномасштабных СФЭС



Источник: IEA.

Рис. 9. Технологическая цепочка производства модулей на основе кристаллического кремния



Источник: IEA.

Рис. 10. Этапы производства модулей на основе кристаллического кремния

### ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИКРЕМНИЯ ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

В начале производственного процесса лежит металлургический кремний, который получают путем очистки кварца в руднотермических печах. Затем в результате химической реакции металлургического кремния и трихлорсилана в ректификационных колоннах получают поликремний.

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ КРЕМНИЕВЫХ СЛИТКОВ И ПЛАСТИН

Полученный поликремний используется в процессе Чохральского для изготовления слитков кристаллического кремния. Из слитков формируются кремниевые пластины путем квадратирувания, шлифовки, а также нарезки кремниевых слитков тонкой алмазной проволокой.

### СОЗДАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для возможности производства электроэнергии кремниевые пластины преобразуются в солнечные элементы (ячейки), которые размещаются на подложке солнечного модуля, соединяются и ламинируются. С обеих сторон пластины припаиваются проводники.

### СБОРКА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В МОДУЛИ

Солнечные элементы собирают в модули. Солнечные модули обычно комплектуются передним стеклом (а также задним, в зависимости от модели), распределительной коробкой и алюминиевой рамой.

Источник: АРВЭ.

14 ГОСТ Р 51594–2000. Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Термины и определения.

# 02

## РЫНОК СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ

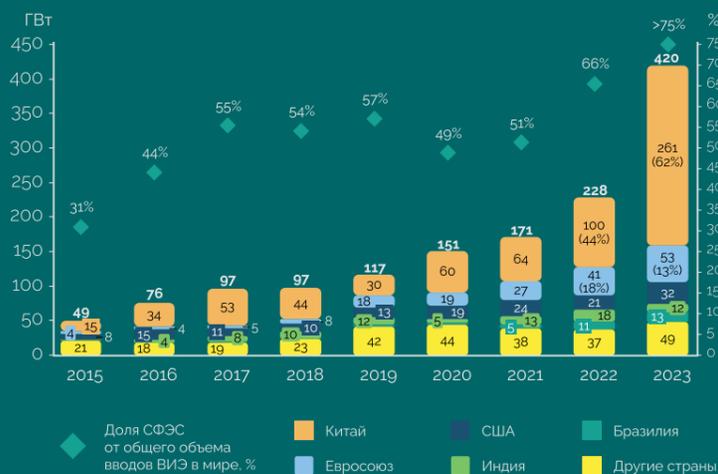


Рис. 11. Производство фотоэлектрических модулей по технологиям в мире, ГВт



Источник: IEA PVPS.

Рис. 12. Динамика вводов солнечных фотоэлектрических станций и доля СФЭС в общем объеме вводов ВИЭ-генерации в мире



Источник: IEA, APВЭ.

Рис. 13. Динамика производственных мощностей по выпуску солнечных модулей, ГВт



Источник: IEA PVPS, CPIA.

Сейчас на мировом рынке солнечной фотоэлектрической энергетики преобладают модули, собранные из фотоэлектрических элементов на основе кристаллического кремния, доля которых по итогам 2022 года составила 97,5% в общем объеме производства солнечных модулей. Для производства 94,6% всех модулей в 2022 году использовался монокристаллический кремний, что соответствует почти 360 ГВт и более чем в 30 раз превышает объем производства монокристаллических модулей в 2015 году. При этом производство около 90% всех выпускаемых солнечных модулей основано на разрезанных пополам (Half-cut) кремниевых фотоэлектрических элементах. Доля тонкопленочных технологий, среди которых лидируют модули из теллурида кадмия, снизилась за год с 4% до 2,5% в 2022 году<sup>19</sup> (Рис. 11).

По прогнозам, производство солнечных элементов на основе кристаллического кремния продолжит быть основной технологией на фотоэлектрическом рынке в текущем десятилетии. В то же время рассматривается возможность серийного производства многослойных и тандемных гибридных фотоэлементов на основе кремния-перовскита или кремния на основе теллурида кадмия (CdTe). Кроме того, ожидается увеличение доли гетеропереходных элементов (HJT), а также применение технологий повышения эффективности (например, TOPCon). Эти решения могут повысить эффективность солнечных элементов более чем на 30% при конкурентоспособных производственных затратах<sup>20</sup>.

В 2023 году в мире были достигнуты максимальные объемы вводов СФЭС<sup>21</sup>: построено и введено в эксплуатацию около 420 ГВт солнечной генерации (прирост — 85% год к году)<sup>22</sup>. С 2015 по 2023 год среднегодовой темп роста вводов СЭС и, соответственно, солнечных модулей составил 31%.

В разрезе стран с 2020 года лидерские позиции по вводам солнечных электростанций принадлежат Китаю, на который на рассматриваемом промежутке приходилось 40–50% мировых запусков СЭС. В 2023 году Китай укрепил позицию лидера в глобальном развитии солнечной

19 IEA PVPS (2023). Trends in Photovoltaic Applications 2023.  
 20 Классификация технологий повышения эффективности ФЭМ в целях продажи наиболее коммерчески жизнеспособных решений с наибольшими объемами производства электроэнергии представлена в Табл. 2 Приложения 1.  
 21 В рамках данного анализа установленная мощность СФЭС принимается равной совокупной мощности солнечных модулей.  
 22 IEA (2024). Clean Energy Market Monitor — March 2024.

энергетики и запустил 261 ГВт СФЭС<sup>23,24</sup>. В Евросоюзе объем вводов СФЭС составил 53 ГВт (Рис. 12).

### Мировые производственные мощности по выпуску солнечных модулей

Для удовлетворения растущего спроса на солнечные модули необходимы наличие и успешная эксплуатация соответствующих производственных площадок. Уже в 2015 году в мире существовало около 100 ГВт мощностей по промышленному производству солнечных модулей.

В связи с рекордным спросом на солнечную генерацию в течение последних лет мировые производственные мощности в период с 2020 по 2023 год выросли более чем в 3 раза. По состоянию на 2023 год на долю Китая приходилось около 80% всех мировых мощностей по производству солнечных модулей — 861 ГВт, что вдвое превышает мировой годовой объем вводов СФЭС. Всего в мире на конец 2023 года производственные мощности по выпуску солнечных модулей превысили 1000 ГВт (Рис. 13)<sup>25</sup>.

Согласно прогнозам Wood Mackenzie и Rystad Energy, в 2024 году производственные мощности в Китае вырастут еще на 500–600 ГВт, поскольку крупнейшие китайские производители, включая Longi, Jinko Solar и JA Solar, планируют продолжить строить новые заводы<sup>26</sup>.

Доминирующее положение китайского региона обусловлено тем, что крупнейшие мировые компании, производящие солнечные модули, ячейки, кремниевые пластины и поликремний, располагаются на его территории. Активное развитие производства компонентов оборудования для солнечной энергетики в Китае стало результатом действий китайских компаний и правительства. В первую очередь к таким действиям относятся:

- Обеспечение устойчивого притока ресурсов для инновационной деятельности, финансирование НИОКР и развитие кадрового потенциала<sup>27,28</sup>;
- Государственная поддержка создания промышленных предприятий солнечной энергетики с вертикально интегрированной производственной цепочкой и масштабированием производства солнечных модулей при дополнительном обеспечении доступа к капиталу<sup>29,30</sup>;

23 Bernreuter (2024). China saves its solar industry with installation record of 260 GW.

24 Только в декабре 2023 года в Китае были введены в эксплуатацию 63,5 ГВт СФЭС — столько же, сколько за весь 2021 год.

25 NREL (2024). Quarterly Solar Industry Update.

26 Reuters (2024). China solar industry faces shakeout, but rock-bottom prices to persist.

27 Climate Scorecard (2021). The Chinese Government as Solar Power Entrepreneur and the Examples of Suntech and Longi Green Energy Technology Company.

28 pv magazine (2024). Are the days of cheap finance for Chinese solar over?

29 globaltimes.cn (2024). China's green capacity brings opportunities for developing countries' industrialization.

30 IEA (2023). Renewable Energy Market Update.

- Проведение политики создания и поддержки внутренних рынков.
- В 2023 году объем производства солнечных модулей в Китае составил 499 ГВт, что на 69,3% превышает производство в 2022 году — 289 ГВт. Ожидается, что в 2024 году производство модулей в Китае превысит 750 ГВт. Всего в мире в 2023 году было произведено около 569 ГВт фотоэлектрических модулей.

### Основные мировые производители солнечных модулей

Активное развитие производственного сектора в Китае на протяжении последних нескольких лет было обусловлено принятыми в стране мерами поддержки и ускоренным ростом спроса на СФЭС. Компании солнечной промышленности Китая характеризуются высокой рентабельностью и реинвестируют прибыль в расширение внутренних мощностей, а также привлекают новых инвесторов. При этом большинство заводов в этой стране расположены на небольшом отдалении от портов, что облегчает доставку готовой продукции в порты для последующей транспортировки морем.

По итогам 2022 года 4, из 5 крупнейших компаний-производителей солнечных модулей принадлежат китайской юрисдикции (Рис. 14).

Крупнейшие вертикально интегрированные компании увеличивают свое присутствие на рынке по мере вытеснения более мелких игроков. Кроме того, наибольшим преимуществом обладают высокотехнологичные производители, переходящие на более эффективные модули N-типа<sup>31</sup>.

80% мировых производств солнечных модулей сконцентрировано в Китае. Отечественное производство налажено в Индии, США, странах Юго-Восточной Азии, а также в ряде европейских стран, включая Россию (Рис. 15).

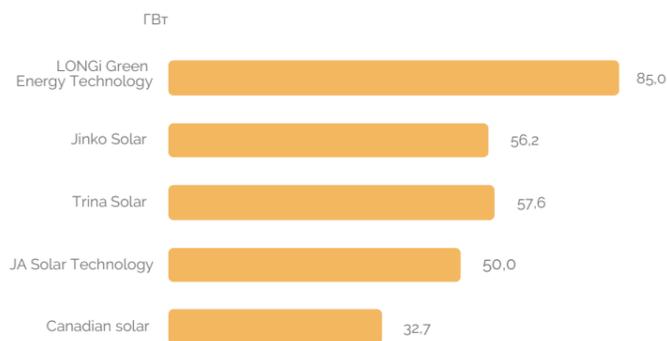
В Индии, благодаря принятым в стране мерам стимулирования отечественного производства в солнечной промышленности, так же наблюдается постепенное наращивание производственных мощностей. По итогам 2023 года, мощность заводов по выпуску солнечных модулей в Индии составила 6% от общемирового показателя — 64,5 ГВт (из которых 2/3 приходится на производство монокристаллических модулей), увеличившись за год на 20,8 ГВт. Прогнозируется, что к 2026 году производственная мощность в Индии превысит 150 ГВт фотоэлектрических модулей в год<sup>32</sup>.

На Рис. 16 представлены объемы производства и поставок модулей крупнейшими игроками за 2022 год. Для данных компаний объем производства солнечных модулей практически идентичен объему поставок (продаж), при этом мировой объем производства модулей (373 ГВт в 2022 году) выше ми-

31 Модули N-типа, помимо кремния, часто включают в себя дополнительные химические элементы (например, галлий) для достижения лучших характеристик в условиях высокой температуры или низкой освещенности.

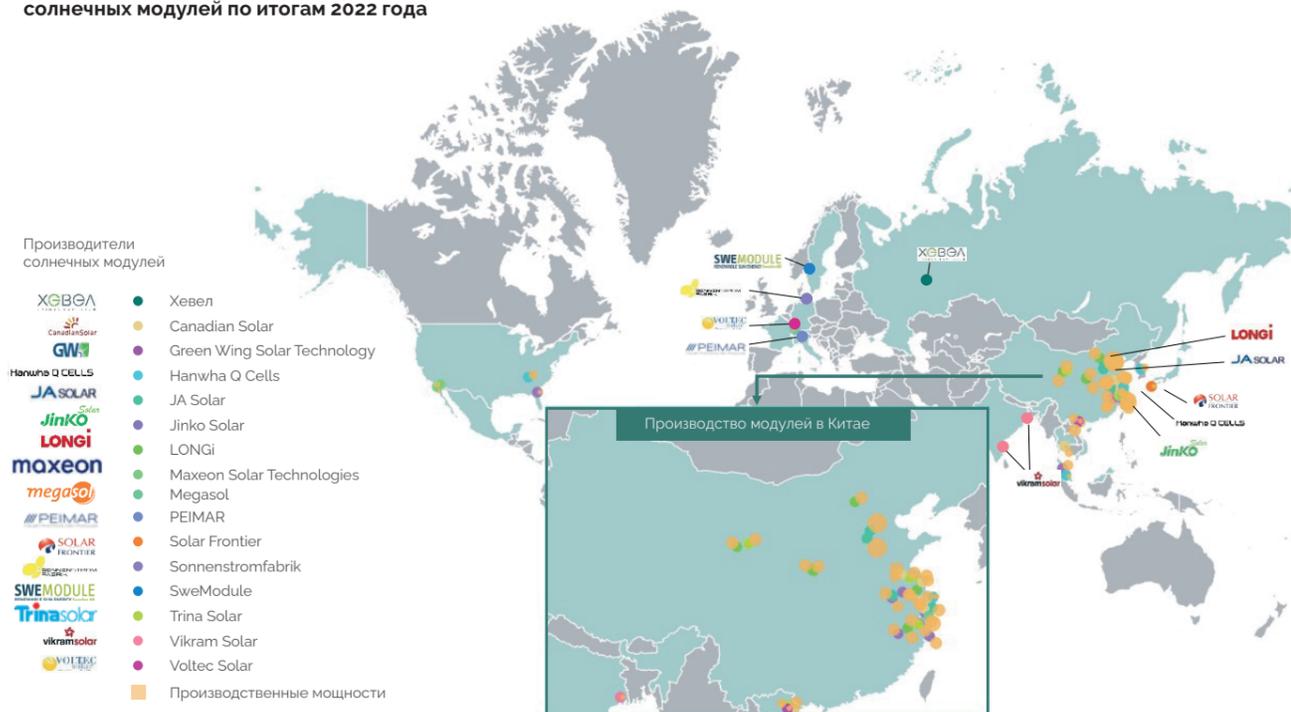
32 Mercom India (2024). State of Solar PV Market in India 2024.

**Рис. 14. Производственные мощности крупнейших производителей солнечных модулей по итогам 2022 года, ГВт**



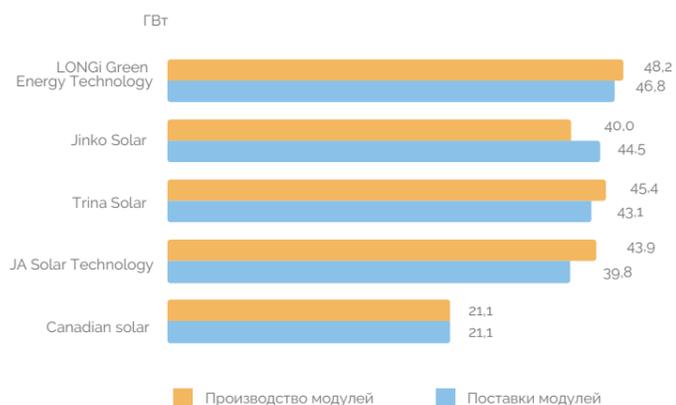
Источник: данные компаний.

**Рис. 15. Распределение заводов по производству солнечных модулей по итогам 2022 года**



Источник: данные компаний, APB3.

**Рис. 16. Объемы производства и поставок модулей крупнейшими игроками за 2022 год, ГВт**



Источник: IEA PVPS.

рового объема поставок (283 ГВт), включая как международные поставки, так и поставки на внутренний рынок. Это может быть объяснено высокой ценовой конкуренцией на рынке солнечных модулей. Только компании с большими производственными мощностями могут обеспечить низкую цену за счет эффекта масштаба.

С более детальной информацией по компаниям-производителям фотоэлектрических модулей можно ознакомиться в Приложении 2.

### МИРОВОЙ РЫНОК СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ

Несмотря на то, что основной объем солнечных модулей, производимых на территории стран, потребляется на внутренних

рынках, значительная часть мирового объема производства экспортируется.

Основным мировым экспортером является Китай, на долю которого приходится примерно 80% мирового экспорта фотоэлектрических модулей. Из 499 ГВт фотоэлектрических модулей, произведенных в Китае в 2023 году, почти половина — 219 ГВт — была экспортирована<sup>33</sup>.

По оценкам Ember, основанным на данных таможенной статистики Китая, в 2023 году Китай сохранил доминирующее положение в экспорте солнечных модулей, увеличив мировые поставки более чем на треть по сравнению с показателями 2022 года (Рис. 17).

Почти половина китайского экспорта солнечных модулей в 2023 году пришлось на

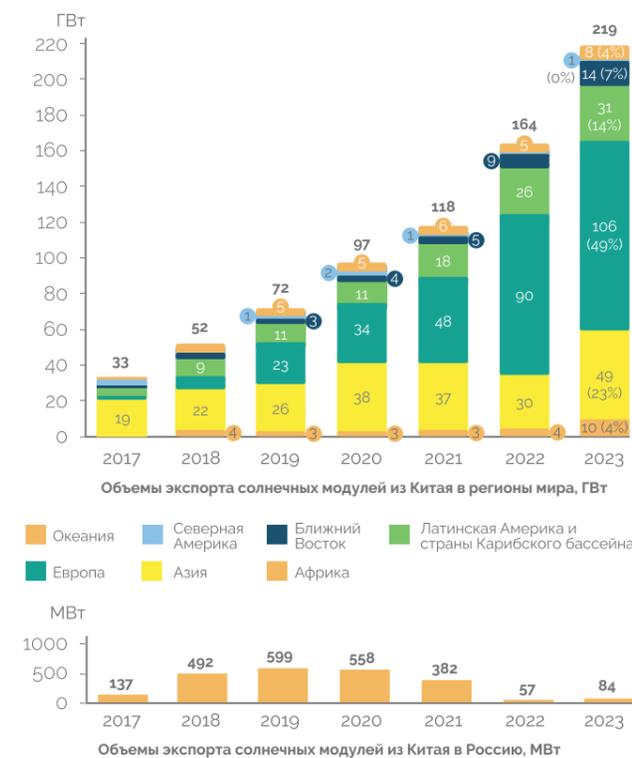
<sup>33</sup> Ember (2024). China solar PV exports.

Европу, где несколько заводов объявили о планах закрытия. При этом, в экспорте модулей в Европу по итогам года наблюдался небольшой спад<sup>34</sup>, связанный с охлаждением торговых отношений Китая и Европы по причине обвинений Китая в недобросовестной конкуренции.

В азиатских странах в 2023 году наблюдался самый большой прирост импорта солнечных модулей из Китая среди всех регионов: по итогам года 23% экспорта ФЭМ из Китая пришлось на страны Азии.

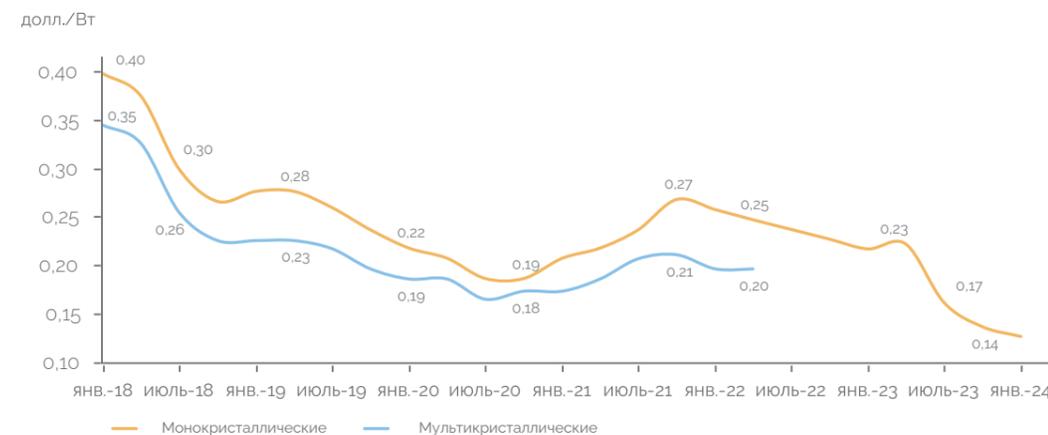
<sup>34</sup> В 2022 году доля Европы в общем объеме китайского экспорта ФЭМ составляла 55%.

**Рис. 17. Объемы экспорта солнечных модулей из Китая**



Источник: Ember (на основе данных таможенной статистики Китая).

**Рис. 18. Динамика спотовых цен на солнечные модули, долл. США/Вт**



Источник: IEA PVPS, pv-magazine\*. \* (pv-magazine (2023). Solar module prices dive to record low)

Третье место по объему экспорта — 14% от общего объема — приходится на Латинскую Америку и страны Карибского бассейна.

Снижение экспорта из Китая в некоторые европейские рынки компенсировалось увеличением экспорта в Таиланд, Бразилию, Мексику, Южную Корею и Малайзию.

Продолжающиеся торговые споры привели к снижению объемов поставок ФЭМ из Китая в США: за год в страну импортировано 563 МВт солнечных модулей, что соответствует лишь 0,3% от общего объема китайского экспорта<sup>35</sup>.

В Россию поставки солнечных модулей из Китая в 2023 году составили 84 МВт.

### ДИНАМИКА ЦЕН НА СОЛНЕЧНЫЕ МОДУЛИ

Мировые спотовые цены на монокристаллические солнечные модули в 2018–2022 гг. снизились с 0,40 до 0,25 долл./Вт<sup>36</sup>. Такое изменение обусловлено удешевлением материалов и снижением материалоемкости ключевых компонентов солнечных модулей. На всем рассматриваемом периоде монокристаллические модули превышали по цене мультикристаллические.

В 2023 году цены на ФЭМ продолжали снижаться, достигнув рекордно низкого уровня в 0,165 долл. США/Вт в августе<sup>37</sup> и 0,135 долл. США/Вт в декабре 2023 года (Рис. 18).

Большой объем мощностей по производству солнечных модулей в Китае, превышающий спрос на внутреннем рынке, привел к мировому переизбытку предложения, спровоцировал обвал мировых цен и введение импортных пошлин со стороны торговых партнеров в целях предотвращения перенасыщения дешевым оборудованием<sup>38</sup>.

<sup>35</sup> Reuters (2024). China steers solar module export stream towards Asia.

<sup>36</sup> Mordor Intelligence (2023). Distributed Solar Power Generation Market Trends.

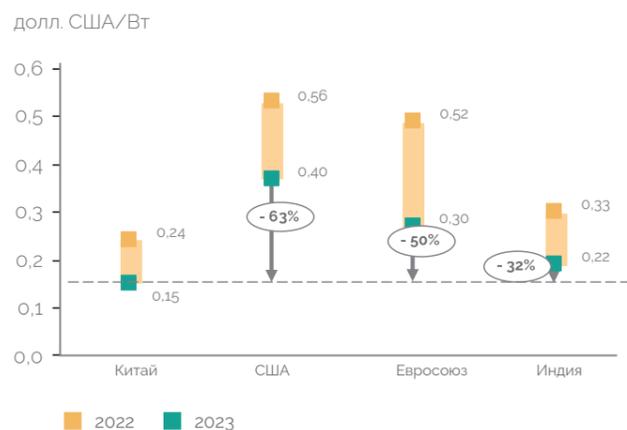
<sup>37</sup> BloombergNEF (2023). 3Q 2023 Global PV Market Outlook.

<sup>38</sup> Reuters (2024). China solar industry faces shakeout, but rock-bottom prices to persist.

По итогам 2023 года из-за избытка предложения цены на произведенные в Китае солнечные модули упали на 42-45% до 0,15 долл. США/Вт. Это более чем на 60% дешевле, чем солнечные модули, полностью произведенные в США, цена которых составила 0,40 долл. США/Вт<sup>39, 40</sup>. По данным Wood Mackenzie, цены модулей, произведенных в Евросоюзе, составили в среднем 0,30 долл. за ватт, а в Индии — 0,22 долл. за ватт (Рис. 19).

В начале 2024 года спотовые цены на модули TOPCon были на уровне 0,11–0,13 долл. США за ватт. В 2024 году устойчивого роста цен на ФЭМ не

**Рис. 19. Изменение цены на солнечные модули, произведенные в разных странах для внутреннего потребления в 2022 и 2023 году, долл. США/Вт**



Источник: Wood Mackenzie.

ождается, поскольку предложение по-прежнему будет опережать спрос, что, в свою очередь, будет ограничивать запуск новых производственных мощностей.

В 2022 году правительства США, Индии и ряда европейских стран стали уделять больше внимания возможности диверсификации цепочки поставок для фотоэлектрической промышленности, принимая протекционистские меры в целях стимулирования отечественного производства определенной продукции, необходимой для развития солнечной энергетики.

Принятый в США Закон о снижении инфляции (Inflation Reduction Act, IRA) предоставляет налоговые льготы для производства поликремния и других компонентов в цепочке производства фотоэлектрической продукции, что способствует повышению конкурентоспособности американских производителей по сравнению с китайскими<sup>41</sup>. К 2030 году данный закон должен позволить США достичь цели по созданию отечественных производственных мощ-

ностей во всех ключевых сегментах фотоэлектрической отрасли<sup>42</sup> с годовым объемом производства 50 ГВт. Однако пока для достижения этого целевого показателя в стране недостаточно производства пластин и солнечных ячеек, а принятые меры стимулирования не позволяют полностью преодолеть разрыв в уровне затрат на производство модулей в США и в Китае.

В Индии в рамках национальной программы поддержки производства высокоэффективной фотоэлектрической продукции (Production Linked Incentive, PLI)<sup>43</sup> также реализованы меры стимулирования локализации производства. Программа направлена на создание полной производственной цепочки от поликремния до солнечных модулей на территории Индии и на снижение зависимости от импортных поставок<sup>44</sup>. Для достижения целей по внутреннему производству ФЭМ в Индии требуется дополнительная финансовая поддержка, которой сейчас недостаточно, а зависимость от компонентов китайского производства сохраняется<sup>45</sup>.

В Евросоюзе пока отсутствует специальное регулирование, способствующее наращиванию собственных производств солнечных модулей.

По оценкам МЭА, в 2023 году стоимость производства фотоэлектрического модуля, начиная с этапа производства поликремния и до конечного модуля, в Индии, США и Европейском союзе выше, чем в Китае, на 10%, 30% и 60% соответственно. Разница обеспечивается не только более высоким объемом инвестиций и эффектом масштаба, но и разрывом затрат на рабочую силу и электроэнергию, а также меньшими масштабами производства. К 2028 году превышения по этим показателям могут возрасти до +70% в Индии, +100% в США и +140% в Европейском союзе<sup>46</sup>.

### РАЗВИТИЕ СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

Активное развитие сектора солнечной энергетики России стартовало в 2013 году, когда на оптовом рынке электрической энергии и мощности был принят механизм стимулирования инвестиций в строительство генерирующих объектов ВИЭ посредством оплаты мощности таких объектов с использованием договоров о предоставлении мощности (далее — ДПМ ВИЭ). За 11 лет установленная мощность объектов солнечной генерации увеличилась в семь раз и достигла 2,19 ГВт по итогам 2023 года, что соответствует 36% от общей

42 U.S. DOE (2022). Reaching for the Solar Future: How the Inflation Reduction Act Impacts Solar Deployment and Expands Manufacturing.

43 MNRE (2023). Production Linked Incentive (PLI) Scheme: National Programme on High Efficiency Solar PV Modules.

44 IEA (2023). Renewable Energy Market Update.

45 Wood Mackenzie (2023). China's solar exports booming, up 64% in 2022 despite global trade tensions.

46 IEA (2024). Renewables 2023.

установленной мощности ВИЭ-генерации в России<sup>47</sup>. К 2035 году, согласно принятым инвестиционным решениям и программам государственной поддержки, а также при условии планомерного развития сегмента собственной генерации промышленности, объем энерго мощностей СФЭС может достичь 7 ГВт (Рис. 20).

Несмотря на то, что в течение длительного времени стоимость российских проектов ВИЭ-генерации была выше мировых аналогов, с 2014 года одноставочная цена электроэнергии СЭС по результатам отборов инвестиционных проектов ДПМ ВИЭ снизилась на 88% (в ценах 2021 года), тренд

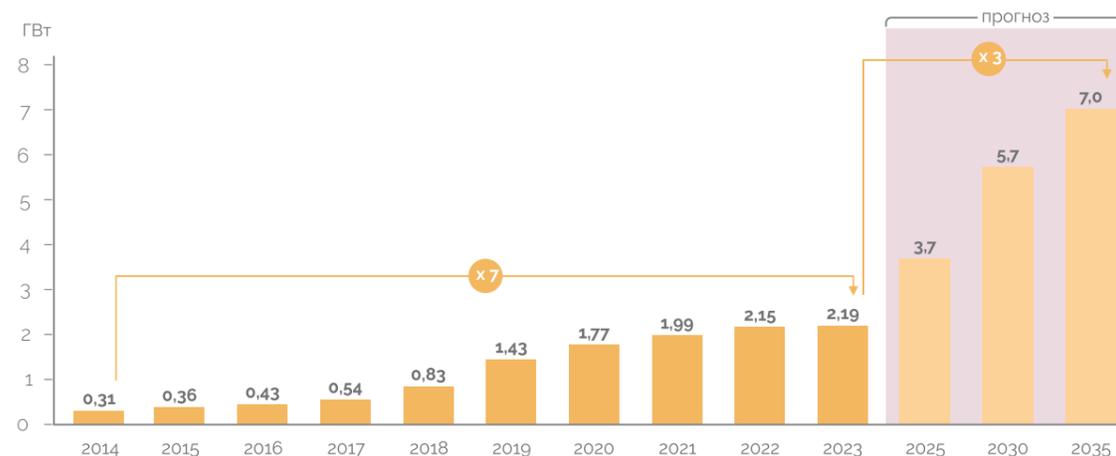
на падение цены электроэнергии будет сохраняться как минимум до 2030 года (Рис. 22).

С 2013 года российская солнечная энергетика развивается с учетом жестких требований по локализации производства оборудования. Принятые программы поддержки на оптовом и розничных рынках подразумевают, что право на получение поддержки и возврата капложений в проект строительства ВИЭ-генерации инвестор получает только в случае, если проект реализован с использованием локализованного оборудования.

В 2015 году состоялся запуск производства солнечных моделей на заводе ООО «Хевел»

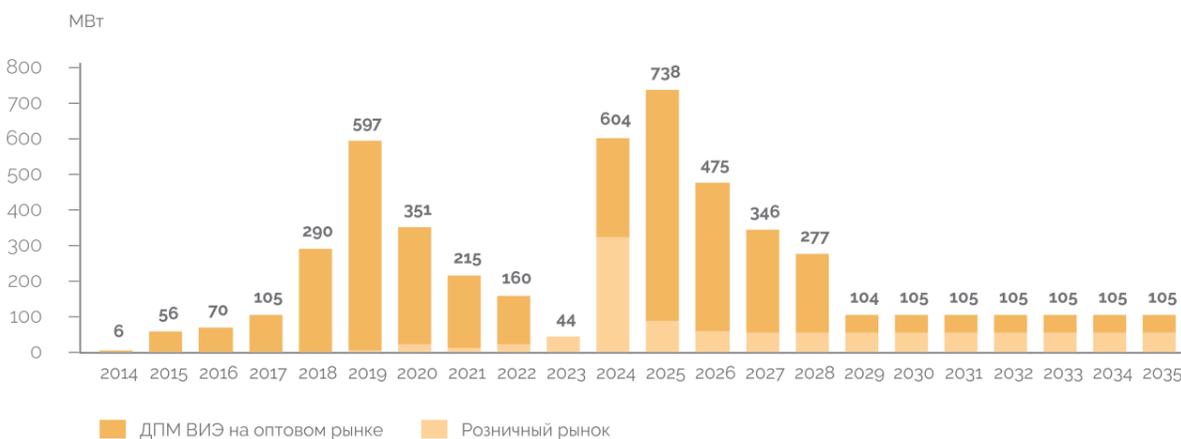
47 В России по итогам 2023 года установленная мощность объектов возобновляемой энергетики составляет 6,12 ГВт (без учета гидроэлектростанций установленной мощностью больше 50 МВт).

**Рис. 20. Совокупная установленная мощность солнечных электростанций в России, ГВт**



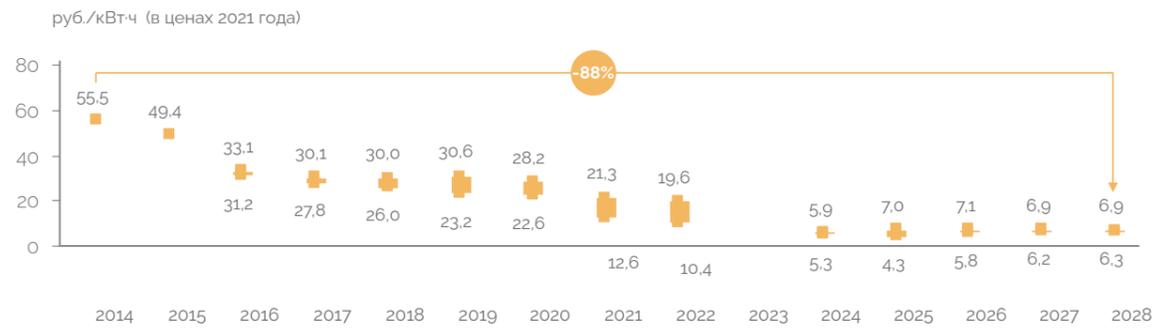
Источник: АРВЭ, АО «СО ЕЭС», НП «Совет рынка».

**Рис. 21. Объем вводов солнечных электростанций в России, МВт (факт и прогноз)**



Источник: АРВЭ, АО «СО ЕЭС», НП «Совет рынка», АО «АТС».

Рис. 22. Динамика одноставочных цен электроэнергии СЭС по результатам конкурсных отборов ДПМ ВИЭ в России, руб./кВт·ч



Источник: АРВЭ, АО «АТС».

в Новочебоксарске — первого в России производства высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей и модулей нового поколения. Производственная мощность завода на конец 2023 года составила 350 МВт в год. Достигнут коэффициент полезного действия (далее — КПД) солнечной ячейки более 23,5%, что является крайне высоким показателем.

В 2024 году на заводе прошел пятый этап модернизации производства, направленный на расширение

линейки выпускаемой высокотехнологичной конкурентоспособной в России и за рубежом продукции из фотоэлектрических преобразователей по технологии гетероперехода (HJT) типоразмера M10. В результате модернизации производственная мощность завода составляет 669 МВт ФЭМ в год. Производимая продукция не только потребляется на внутреннем рынке, но и с 2018 года поставляется в другие страны, в том числе в страны ЕАЭС, СНГ, Африки и АТР.

Сейчас около 98% общемирового производства солнечных модулей приходится на модули, собранные из фотоэлектрических элементов на основе кристаллического кремния. Ожидается, что данная технология сохранит лидирующую позицию на фотоэлектрическом рынке в текущем десятилетии. Дополнительно будут развиваться и применяться различные технологии повышения эффективности.

В связи с рекордным спросом на солнечную генерацию в течение последних лет мировые мощности по производству ФЭМ ежегодно растут. По итогам 2023 года глобальный объем производственных мощностей превышает 1000 ГВт, на долю Китая приходится более 80% всего объема — 861 ГВт (с плановым приростом в объеме 500–600 ГВт в 2024 году).

Даже с учетом прогнозируемого роста глобального объема мощности СФЭС по сценарию IRENA 1,5°C, в соответствии с которым ежегодный прирост мощности составит в среднем не менее 578 ГВт до 2030 года, производственных мощностей Китая уже достаточно, чтобы обеспечить мировой спрос на 100%.

В 2023 году объем производства солнечных модулей в Китае составил 499 ГВт при внутреннем потреблении в объеме 261 ГВт (глобальный объем вводов — 420 ГВт). Около 220 ГВт были экспортированы из Китая в другие страны, что соответствует 90% мирового экспорта ФЭМ.

Активное развитие производственного сектора в Китае на протяжении последних нескольких лет было обусловлено принятыми в стране мерами поддержки и ускоренным ростом спроса на СФЭС. Прогнозируется, что благодаря сохранению на высоком уровне доли Китая в мировом экспорте, его политика будет иметь сильнейшее влияние на цены солнечных модулей.

Правительства США, Индии и некоторых стран Европы в целях сохранения технологического суверенитета стали уделять больше внимания возможности диверсификации цепочки поставок для фотоэлектрической промышленности, принимая протекционистские меры, направленные на стимулирование производства ФЭМ. Отечественное производство ФЭМ налажено в Индии, США, странах Юго-Восточной Азии, а также в ряде европейских стран, включая Россию.

Сейчас доля российских производственных мощностей по выпуску солнечных модулей на мировом рынке не превышает 0,06%, однако, несмотря на это, локализованное производство играет ключевую роль в обеспечении технологического суверенитета страны и формировании национальных компетенций на перспективном быстрорастущем рынке.



03

**РЫНОК КРЕМНИЕВЫХ  
СОЛНЕЧНЫХ ПЛАСТИН**

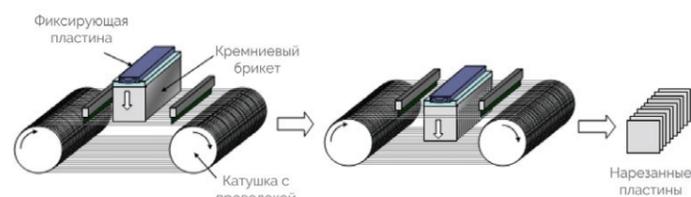


Кремниевые солнечные пластины представляют собой различные по форме и толщине кремниевые изделия, полученные в результате нарезки предварительно квадратированных и шлифованных кремниевых слитков. Такая нарезка может осуществляться при помощи распиловки стальной проволокой или с помощью тонкой алмазной проволоки<sup>48</sup>. На **Рис. 23** приведен пример устройства для нарезки кремниевого брикета на пластины при помощи алмазной проволоки<sup>49, 50</sup>.

При этом форма и размеры кремниевых пластин имеют свой стандартизированный модельный ряд исходя из толщины и геометрических параметров. Сегодня на рынке представлены порядка 10 типоразмеров кремниевых пластин, отличающихся формой и габаритами<sup>51</sup>. В **Табл. 1** приведен основной модельный ряд солнечных пластин, применяемых для производства фотоэлектрических элементов.

На **Рис. 24** представлена хронология развития моделей пластин от самых ранних до наиболее современных конфигураций<sup>52</sup>.

**Рис. 23. Процесс производства солнечных пластин методом резки алмазной проволокой**

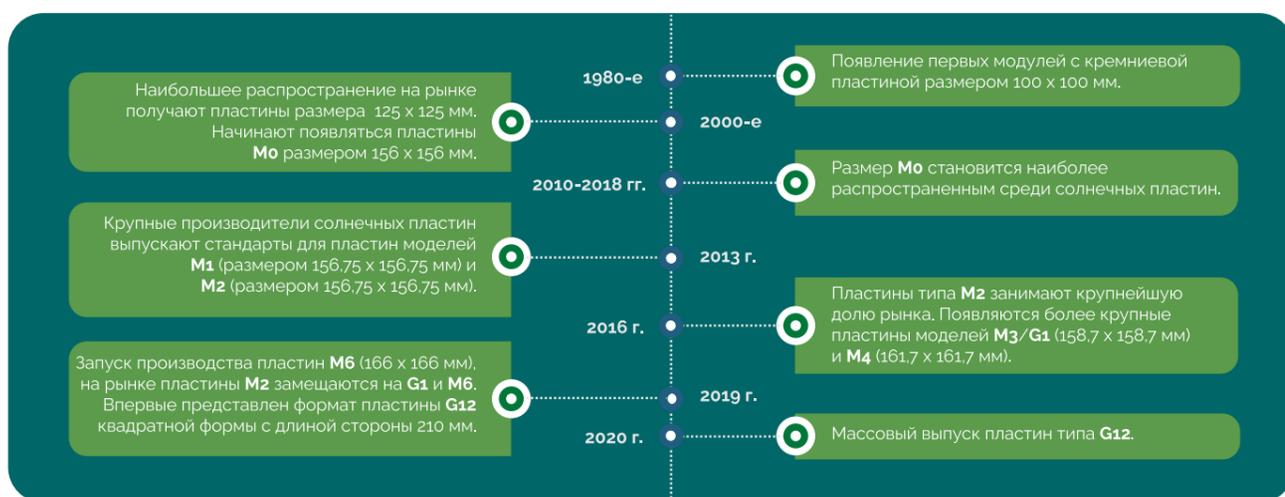


Источник: APV3

**Табл. 1. Модельный ряд солнечных пластин**

Модель	Габариты сторон, мм	Форма
M0	156,00 x 156,00 мм	Псевдоквадрат
M2	156,75 x 156,75 мм	Псевдоквадрат
M3	158,75 x 158,75 мм	Псевдоквадрат
G1	158,75 x 158,75 мм	Квадрат
M4	161,70 x 161,70 мм	Псевдоквадрат
M6	166,00 x 166,00 мм	Псевдоквадрат
M10	182,00 x 182,00 мм	Псевдоквадрат
M12 / G12	210,00 x 210,00 мм	Квадрат

**Рис. 24. Технологическое развитие производства пластин**



Источник: NREL

Динамика развития модельного ряда солнечных пластин демонстрирует тенденцию увеличения размера изделий с каждой новой моделью. Увеличение площади пластин повышает эффективность модуля за счет достижения большей производительности. Снижение количества модулей для достижения определенной мощности позволяет снизить капитальные затраты на вспомогательное оборудование солнечной электростанции и удельную стоимость пикового ватта, а с этим — общую стоимость электроэнергии, произведенной солнечными модулями нового поколения.

Преимущества крупных пластин привели к уверенному вытеснению более мелких форматов с рынка в период 2017-2022 гг. Например, в 2022 году доля пластин со стороной менее 156,75 мм в общей структуре продаж составила порядка 1%, хотя еще в 2018 году на пластины такого формата приходилось более 80% продаж<sup>53</sup> (**Рис. 25**).

### МИРОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ МОЩНОСТИ ПО ВЫПУСКУ СОЛНЕЧНЫХ ПЛАСТИН

В настоящее время объем рынка кремниевых пластин активно растет<sup>54</sup>. В период 2015–2023 гг. мировые мощности по производству солнечных пластин выросли в 12 раз, достигнув около 910 ГВт в 2023 году. Абсолютное лидерство на рынке кремниевых пластин принадлежит Китаю, на долю которого приходится 98% глобальных производственных мощностей — 892 ГВт по итогам 2023 года (**Рис. 26**).

Объем глобального производства пластин за этот период вырос в 10 раз и составил в 2023 году примерно 634 ГВт/год. Китай обеспечил выпуск более 622 ГВт пластин, из которых 70,3 ГВт ушли на экспорт. По предварительным оценкам, в 2024 году производство пластин в Китае может достичь 935 ГВт<sup>55</sup>.

На сегодняшний день 98% общего производства пластин в Китае составляют пластины большого размера (182 мм и 210 мм), представляющие собой отраслевой стандарт. По данным Китайской ассоциации фотоэлектрической промышленности (CPIA), в 2023 году рынок также начал постепенный переход к прямоугольным пластинам, обеспечив 10% производства. Ожидается, что в 2024 году их доля на рынке вырастет до 30%<sup>56</sup>.

53 ISA (2023). Global solar PV supply chains.

54 Solarbe global (2023) China takes 97.9% of global wafer capacity in 2022.

55 EnergyTrend (2024). A Brief Overview of China PV Industry.

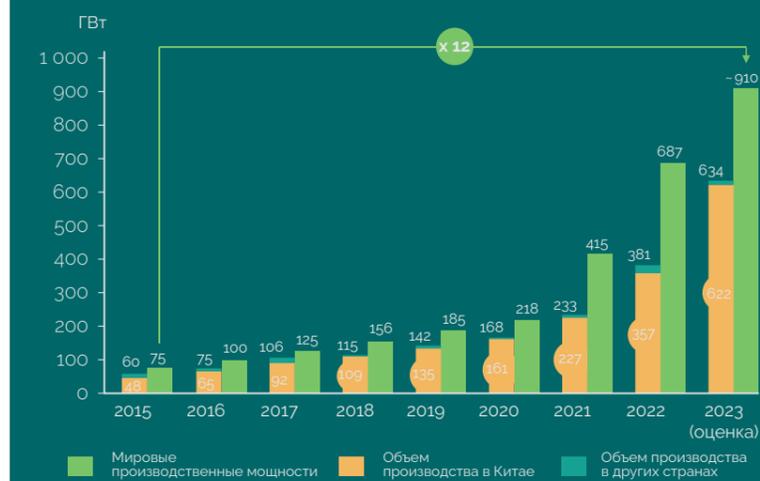
56 Taiyang news (2024). MIIT Counts Over 622 GW Silicon Wafer Production; 212 GW Out Of 499 GW Modules Produced Shipped Overseas.

**Рис. 25. Доли рынка различных размеров кремниевых солнечных пластин, %**



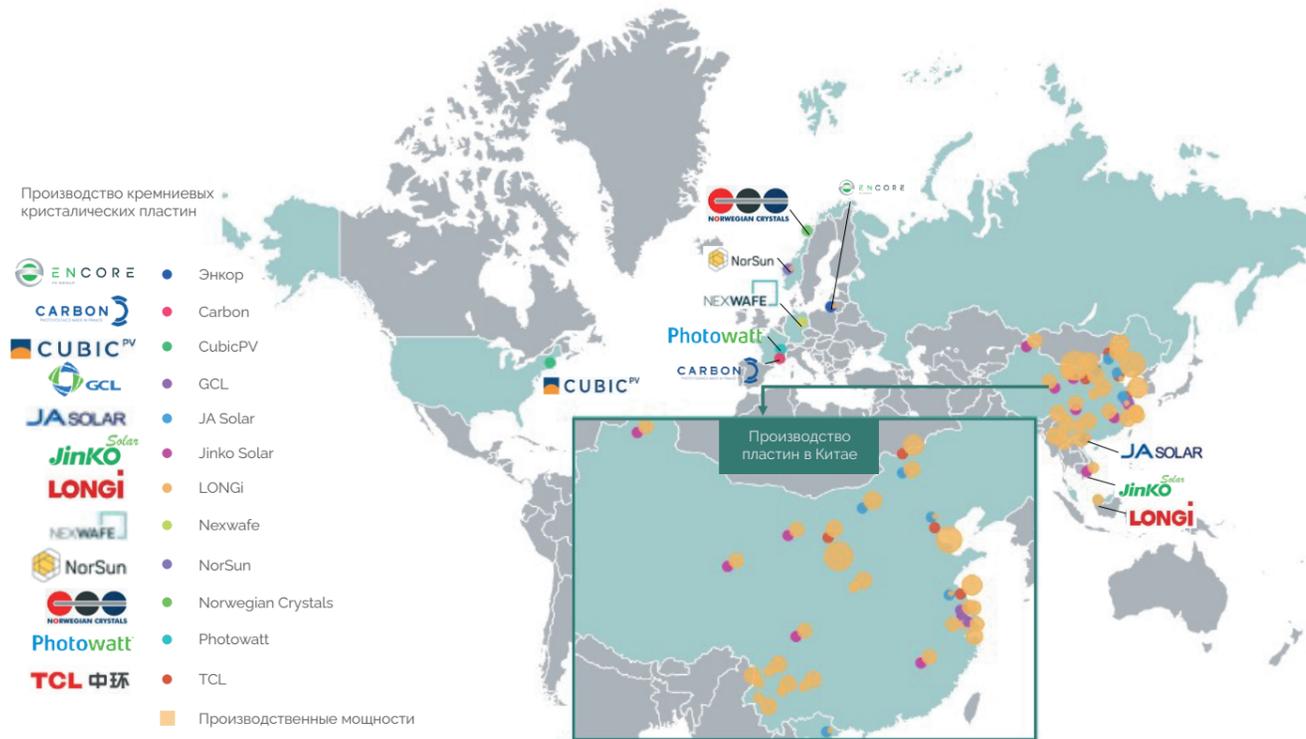
Источник: ISA

**Рис. 26. Производственные мощности и фактические объемы производства кремниевых солнечных пластин, ГВт**



Источник: IEA PVPS, CPIA

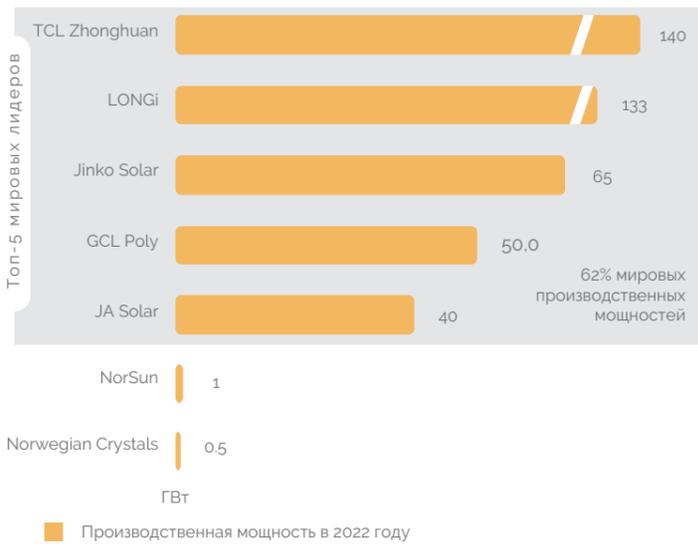
Рис. 27. Распределение крупнейших в мире заводов по производству солнечных кремниевых пластин по итогам 2022 года



\* Диаметр желтой области около каждого завода пропорционален производственной мощности этого завода.

Источник: данные компаний, APBЭ.

Рис. 28. Фактические производственные мощности компаний-производителей солнечных пластин по состоянию на 2022 год, ГВт



Источник: данные компаний. \* Детальная информация о компаниях-производителях фотоэлектрических кремниевых пластин представлена в Приложении 3.

Помимо Китая достаточно крупные объекты по производству солнечных пластин располагаются на территории Европы, США и России (Рис. 27).

На Рис. 28 приведены показатели производственных мощностей производителей солнечных пластин, расположенных внутри и за пределами Китая. По итогам 2022 года на пять самых крупных компаний Китая приходится 62% мировых мощностей по производству солнечных пластин.

## МИРОВОЙ РЫНОК СОЛНЕЧНЫХ ПЛАСТИН

В 2023 году объем экспорта кремниевых пластин из Китая увеличился почти в два раза по сравнению с предыдущим годом и достиг 70,3 ГВт, что соответствует 11% всего производства кремниевых пластин в стране<sup>57, 58</sup>.

На Рис. 29 представлена динамика объемов мирового экспорта солнечных пластин, из которых около 99% приходится на поставки из Китая. Крупнейшие производители солнечных пластин в стране являются вертикально интегрированными компаниями (т.е. охватывают большую часть производственной цепочки от пластин до солнечных модулей), так что основная масса произведенных ими солнечных пластин используется этими компаниями для последующего производства солнечных ячеек.

Несмотря на низкую долю экспорта в общем объеме производства кремниевых пластин<sup>59</sup>, Китай является крупнейшим экспортером солнечных пластин в мире уже более семи лет. За 2017–2021 гг. глобальный объем экспорта солнечных пластин превысил

57 Министерство промышленности и информационных технологий Китая (2024). Состояние национальной фотоэлектрической промышленности в 2023 году.

58 Solarbe global (2023) China takes 97% of global wafer capacity in 2022.

59 Большая доля производимых в Китае (мире) кремниевых пластин потребляется на внутреннем рынке.

126 ГВт, из которых на долю Китая пришлось 123,7 ГВт (почти 98%)<sup>60</sup>. Основными импортерами в этот период выступили страны Азиатско-Тихоокеанского региона с совокупным импортом в 111,7 ГВт. На Рис. 30 показаны потоки экспорта солнечных пластин между странами за 2017–2021 гг.

## ДИНАМИКА ЦЕН НА СОЛНЕЧНЫЕ ПЛАСТИНЫ

Цены на солнечные кремниевые пластины коррелируют с ценами на поликремний. В связи с ростом спроса на фотоэлектрическую продукцию и повышением цен на поликремний, мировые спотовые цены на кремниевые пластины модели M10 на начало 2022 года составляли почти 90 центов за штуку, что на 70% выше, чем годом ранее (Рис. 31). Высокие цены на солнечные пластины сохранялись в течение первых трех кварталов 2022 года из-за роста спроса на поликремний и нарушений производства поликремния в результате нехватки электроэнергии в Китае<sup>61</sup>. Увеличение объемов производства поликремния с сентября 2022 года в Китае спровоцировало начало тренда на снижение цены солнечных пластин. После краткосрочного роста цен в начале 2023 года последовало дальнейшее снижение цен, в результате чего по итогам 2023 года рыночные цены на кремниевые пластины типа M10 установились на уровне 0,273 долл. США за штуку.

## ПРОИЗВОДСТВО СОЛНЕЧНЫХ ПЛАСТИН В РОССИИ

В 2024 году в Калининградской области на заводе компании ООО "ЭнКОР Групп" создано

60 IEA PVPS. PVPS Reports.

61 LONGi. Спотовые цены на солнечные пластины модели M10.

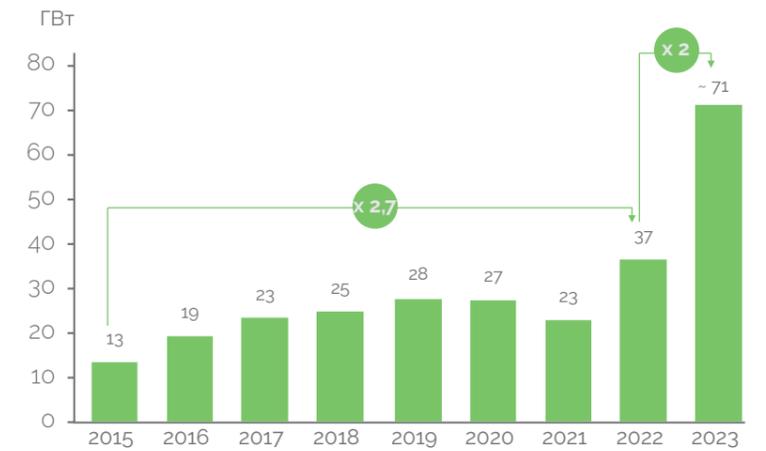
Рис. 31. Динамика цен на поликремний и солнечные кремниевые пластины



Примечание: спотовые цены указаны в деньгах соответствующих лет. Приведенная корреляция означает наличие и силу линейной взаимосвязи между ценами на поликремний и солнечные пластины.

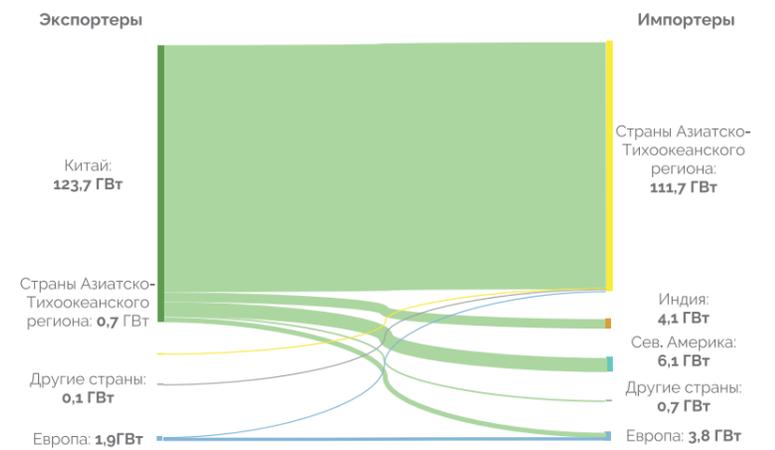
Источник: LONGi, BloombergNEF, PV Insight.

Рис. 29. Объем мирового экспорта солнечных кремниевых пластин, ГВт



Источник: IEA PVPS, Solarbe global.

Рис. 30. Объемы международных поставок солнечных кремниевых пластин за 2017–2021 годы по странам, ГВт



Источник: Solarbe global, IEA, IEA PVPS.

крупнейшее в России производство компонентов для солнечной энергетики на базе гетероструктурной технологии: кремниевых пластин и фотоэлектрических преобразователей. Суммарные инвестиции в проект составили около 30 млрд рублей.

Производственный комплекс позволяет выращивать слитки и производить пластины монокристаллического кремния для солнечных ячеек суммарной мощностью до 1,3 ГВт в год — около 200 млн кремниевых пластин. Запуск производства кремниевых пластин состоялся 25 января 2024 года. В течение года также запланирован запуск производства фотоэлектрических ячеек с планом производства до 1 ГВт в год.

Создание производства ООО «ЭнКОР Групп» и модернизация завода ООО «Хевел» оказывают значительный эффект в формировании технологического суверенитета и дальнейших перспективах эффективного развития отрасли солнечной энер-

гетики Российской Федерации, а также повышении конкурентоспособности российской продукции на международных рынках.

Производство кремневых пластин и фотоэлектрических ячеек на территории Российской Федерации позволит повысить степень локализации производства солнечных модулей. При запланированных ежегодных вводах СФЭС в объеме 100–700 МВт в период 2024–2035 гг. (в среднем 265 МВт в год) около 20% произведенных на заводе «Энкор» кремниевых пластин будут потребляться на внутреннем рынке. Наличие отечественного производителя защитит отрасль от конъюнктурных колебаний и геополитической неопределенности. Хотя российское производство и не может полностью конкурировать с китайскими гигантами по ценовым параметрам, масштаб гигаваттного завода позволит снизить себестоимость производства российского оборудования и предоставить высокотехнологичную альтернативу зарубежным партнерам.

*98% глобальных мощностей по производству кремниевых пластин — 892 ГВт — расположено на территории Китая, являющегося абсолютным лидером на рынке пластин.*

*При этом глобальный объем производства пластин в 2023 году составил примерно 634 ГВт, из которых Китай обеспечил выпуск более 622 ГВт. 98% производимых на территории Китая пластин составляют пластины большого размера (182 мм и 210 мм), представляющие собой отраслевой стандарт.*

*Более 80% объемов производства солнечных модулей в странах мира за пределами Китая является импортозависимым от ключевого компонента солнечного модуля — кремниевых пластин. При этом совокупный объем мощности по производству солнечных модулей в данных странах (более 200 ГВт) почти в 12 раз превышает текущую мощность по производству кремниевых пластин (18 ГВт).*

*В целях снижения зависимости от импортных поставок страны, включая США, Индию, Евросоюз, активно прорабатывают варианты реализации протекционистских мер, направленных на локализацию всех этапов в цепочке производства солнечных модулей, в том числе производства высокого передела — производство ячеек, пластин.*

*Принятие подобных мер формирует предпосылки для отечественного производства наиболее наукоемких компонентов для солнечной энергетики, а также способствует обеспечению национального технологического суверенитета и хеджированию риска резкого изменения цен на крайне волатильном рынке кремниевых пластин.*



# 04

## РЫНОК ПОЛИКРЕМНИЯ



В настоящее время поликристаллический кремний (поликремний) используется в солнечной энергетике в качестве сырья для фотоэлектрических ячеек и модулей, а также в электронной промышленности при производстве полупроводников. В зависимости от особенностей производственного процесса могут быть достигнуты различные уровни чистоты поликристаллического кремния:

- «Первый солнечный уровень»: для производства мультикристаллического кремния с чистотой от 99,99999% (7N) до 99,999999% (8N);
- «Второй солнечный уровень»: для производства монокристаллического кремния с чистотой от 9N до 11N;
- «Электронный уровень»: для полупроводников с чистотой от 11N<sup>62</sup>.

До середины 1990-х годов сверхчистый поликремний производился в первую очередь для полупроводниковой промышленности. Так, в 1995 году 90% производимого в мире поликремния потреблялось производителями полупроводников, и только 10% использовалось в целях производства фотоэлектрических модулей. По мере глобального развития возобновляемой энергетики потребность в «солнечном» поликремнии росла, и уже в 2014 году соотношение между двумя основными секторами потребления поликристаллического кремния изменилось зеркально: на фотоэлектрическую промышленность приходилось 90%, а на полупроводниковую — около 10%.

С 1995 по 2014 год в объемном выражении совокупный спрос на поликремний вырос почти в 20 раз, с 15 тыс. тонн до 278 тыс. тонн<sup>63</sup>, а в 2022 году это значение уже достигло 1 млн тонн. Таким образом в течение последних 30 лет отрасль производства поликремния росла со средним темпом (CAGR) на 17% в год. При этом потребление поликристаллического кремния в фотоэлектрической промышленности выросло за это время в 600 раз — с 1,5 тыс. тонн до более 900 тыс. тонн поликремния в 2022 году<sup>64</sup> (Рис. 32).

### МИРОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ МОЩНОСТИ ПО ВЫПУСКУ ПОЛИКРЕМНИЯ

Поскольку именно фотоэлектрическая промышленность оказала значительное и долгосрочное влияние на развитие рынка поликристаллического

62 Уровни чистоты поликремния различаются по количеству цифр 9 в процентном показателе чистоты поликремния. Например, при чистоте 99,99999% поликремнию присваивается класс чистоты 7N (7 Nines).

63 Bernreuter Research (2020). Polysilicon Uses.

64 PVTIME (2023). 15 Million Tonnes of Polysilicon! Massive New Capacities in China Support PV Growth Globally 2023.

го кремния в мире, дальнейший прогноз спроса на поликремний также будет во многом зависеть от темпов развития сектора солнечной энергетики. По оценкам МЭА, к 2030 году спрос на «солнечный» поликремний составит около 2 млн т<sup>65, 66</sup>.

За 11 лет мировая установленная производственная мощность поликремниевых заводов выросла в 6 раз — с 370 тыс. тонн/год до 2 256 тыс. тонн/год по итогам 2023 года (годовой прирост — около 70%)<sup>67</sup>. Этих мощностей достаточно для ввода в эксплуатацию около 1000 ГВт солнечных электростанций в год<sup>68, 69</sup>. Фактический объем мирового производства также значительно вырос за последнее десятилетие: в 2023 году глобальное производство поликристаллического кремния составило 1 600 тыс. тонн, что более чем на 50% превышает показатель прошлого года (Рис. 33). С 2012 по 2022 год среднемировой показатель загрузки производства составил 78%.

Большинство заводов по производству поликремния сконцентрировано в нескольких странах мира (в пятерку лидеров по объемам установленной мощности входят Китай, США, Германия, Малайзия и Япония). При этом за последнее десятилетие лидером рынка стал Китай, на территории которого по итогам 2023 года размещены предприятия с мощностью производства 2,1 млн т поликремния в год — 93% всех мировых мощностей по производству поликремния (85% — в 2022 году)<sup>70, 71</sup>. Годовой прирост производственных мощностей в Китае по сравнению с 2022 годом составил 80% (Рис. 34).

К концу 2024 года по планам, раскрытым различными компаниями, номинальная мощность производства поликремния в Китае достигнет около 3,17 млн тонн, что соответствует потенциалу произ-

65 IEA (2023). World Energy Outlook 2023.

66 Прогнозируется, что в 2023–2032 годы также будет наблюдаться рост спроса на поликремний для полупроводниковой промышленности, что связано с технологическими достижениями в микроэлектронике и растущей потребностью в современных электронных устройствах с более сложными и мощными электронными компонентами.

67 EnergyTrend (2024). Global Distribution of Polysilicon Manufacturing.

68 CEF (2023). Solar Pivot: A massive global solar boom is disrupting energy markets and speeding the transition.

69 PVTIME (2023). 15 Million Tonnes of Polysilicon! Massive New Capacities in China Support PV Growth Globally 2023.

70 До 2010 года лидером по объему производственных мощностей были США. С 2010 по 2015 год Китай увеличил свои производственные мощности быстрее, чем остальной мир, что привело к существенному избытку мировых поставок, резкому падению цен на поликремний и вытеснению многих производителей с рынка. С 2015 по 2021 год производство поликремния в Китае выросло почти на 400%.

71 EnergyTrend (2024). Global Distribution of Polysilicon Manufacturing.

водства 1400 ГВт СФЭС в год<sup>72</sup>. Примечательно, что в 2023 году BloombergNEF прогнозировал, что глобальные производственные мощности по выпуску поликремния составят около 2,5 млн т к 2025 году и смогут обеспечить ввод 940 ГВт СФЭС в год, что превышает требуемый среднегодовой объем вводов солнечных электростанций — 600 ГВт — на горизонте 2030–2050 годов, необходимый по сценарию IRENA для того, чтобы оставаться на пути снижения температуры на 1,5°C (1.5°C Scenario)<sup>73</sup>.

С учетом фактического объема производственных мощностей во всем секторе фотоэлектрической генерации в мире, этого уже более чем достаточно, чтобы удовлетворить уровень годового спроса на горизонте до 2030 года. По оценкам Шанхайской биржи металлов, в 2024 году темпы роста производственных мощностей будут намного ниже, чем в 2023 году, а избыточные мощности уменьшатся, поскольку многие заводы, оказавшиеся в убытках, снизят операционные показатели из-за падения цен на поликремний до уровня себестоимости и наличия больших объемов запасов.

В тройку стран-лидеров по годовому объему производства поликремния (в том числе для электроники) в 2021 году вошли Китай (623 тыс. т), Германия (65 тыс. т, из которых почти 60 тыс. т — для фотоэлектрических элементов) и Малайзия (30 тыс. т)<sup>74</sup>. В 2022 году производственные мощности Китая обеспечили выпуск 827 тыс. т поликремния<sup>75</sup>, а в 2023 году — 1430 тыс. т (при спросе для кремниевых пластин в объеме 1340 тыс. т)<sup>76</sup>.

В 2024 году ожидается, что производство поликремния в Китае превысит 2100 тыс. т<sup>77</sup>.

Распределение объемов производства поликристаллического кремния по странам-лидерам представлено на Рис. 35<sup>78, 79</sup>.

### МИРОВЫЕ ПРОИЗВОДИТЕЛИ ПОЛИКРЕМНИЯ

По итогам 2022 года на 10 крупнейших в мире компаний-производителей поликристаллического

72 SMM (2024). Silicon products and module prices plummeted in 2023. Polysilicon supply growth will slow down in 2024, installed capacity to hit a new high.

73 IRENA (2023). World Energy Transitions Outlook 2023.

74 IEA PVPS (2022). Trends in Photovoltaic Application.

75 pv magazine (2023). China produced 288.7 GW of modules, 827,000 MT of polysilicon in 2022.

76 Министерство промышленности и информационных технологий Китая (2024). Состояние национальной фотоэлектрической промышленности в 2023 году.

77 EnergyTrend (2024). A Brief Overview of China PV Industry.

78 IEA (2022). Solar PV Global Supply Chains.

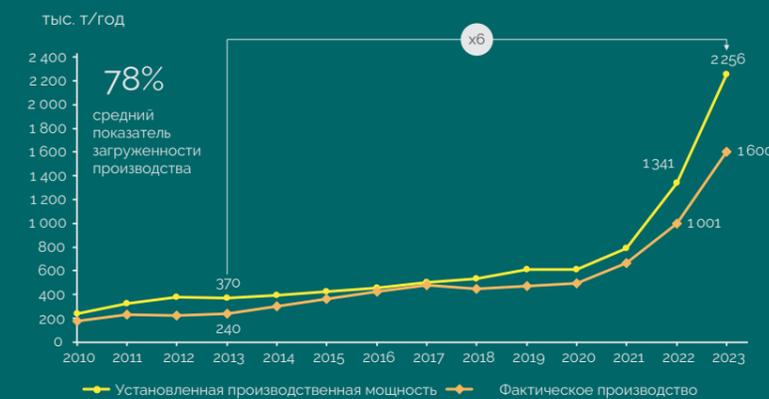
79 ISA (2023). World Solar Technology Report.

Рис. 32. Изменение структуры и объемов спроса на поликристаллический кремний



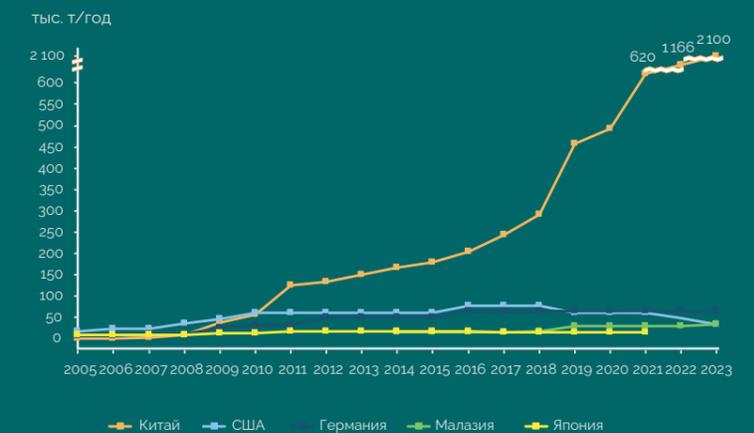
Источник: Bernreuter Research, PVTIME

Рис. 33. Производственные мощности и фактическое производство поликремния в мире, тыс. т/год



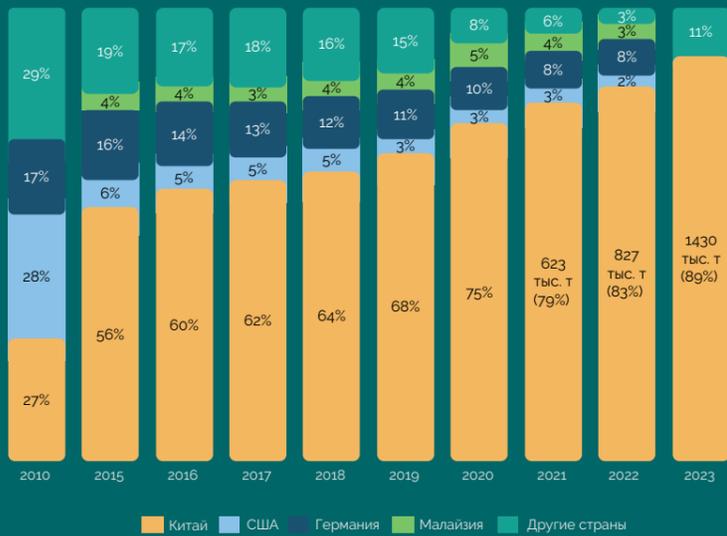
Источник: Bloomberg, PVTIME

Рис. 34. Рост производственных мощностей по выпуску поликремния в ключевых странах, тыс. т/год



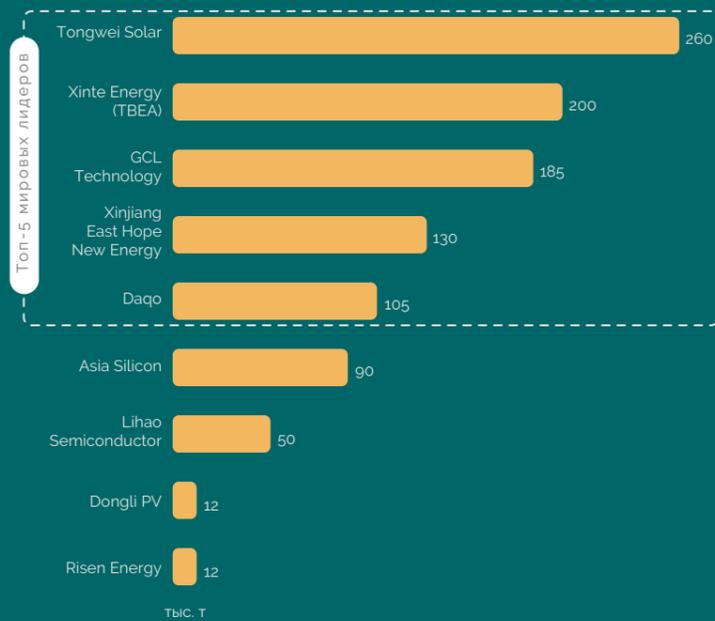
Источник: ISA, EnergyTrend

Рис. 35. Объемы производства поликремния по странам-лидерам, %



Источник: IEA, Министерство промышленности и информационных технологий Китая.

Рис. 36. Производственная мощность крупнейших производителей поликремния в Китае по итогам 2022 года, тыс. т/год



Источник: PVTIME, годовые отчеты компаний.

ского кремния приходится около 85% всех мировых мощностей по выпуску поликремния — свыше 1,1 млн т в год<sup>80</sup>. Благодаря этим компаниям фактическое производство поликремния в 2022 году увеличилось в 1,5 раза и составило примерно 0,9 млн т. Такой прирост был обусловлен вводом в эксплуатацию новых производственных линий таких китайских компаний, как Tongwei Solar, GCL, Xinte Energy, Qinghai Lihao Semiconductor, Asia Silicon, а также возобновлением производства компаниями Yichang CSG Polysilicon и Juguang Silicon (дочерняя организация Risen). В начале 2023 года в период восстановления цен на поликремний, последовавшего за их резким падением, количество объявленных проектов по наращиванию выпуска поликремния росло. Однако часть из них по мере снижения стоимости на поликремний позже была отменена. Реальный шаг на пути к реализации объявленных целей сделал, например, мировой лидер рынка — компания Tongwei Solar, начав в марте 2023 года строительство завода с производственной мощностью 200 тыс. т поликремния в год, а в декабре на фоне серьезного избытка производственных мощностей на китайском рынке, объявив о новом двухэтапном проекте совокупной мощностью 400 тыс. т поликремния в год с запуском первого этапа до конца 2025 года<sup>81</sup>. Производитель поликремния Daqo New Energy также в декабре 2023 года подписал инвестиционное соглашение о строительстве нового завода в провинции Синьцзян в Китае с плановым объемом производства 100 тыс. т поликремния<sup>82</sup>.

Несмотря на то, что спрос на солнечную генерацию увеличивается, начиная с 2024 года в течение 12–18 месяцев число производителей поликремния в Китае может сократиться на 25%. Многие производители поликремния продают продукцию по себестоимости и больше не объявляют о планах строительства новых заводов. На уже функционирующих заводах отменяются последующие этапы расширения производства, а по строящимся объектам принимаются решения по отсрочке ввода в эксплуатацию<sup>83</sup>.

По прогнозам экспертов, на рынке поликремния будут продолжать лидировать несколько крупных игроков, которые давно присутствуют на рынке и ранее зарабатывали

80 Детальная информация о компаниях-производителях поликремния представлена в Приложении 4.

81 Bloomberg (2023). Top Chinese Solar Firm Tongwei Plans \$4 Billion Factory as Consolidation Looms.

82 PV-TECH (2023). Daqo signs investment agreement to build new silicon-based facility in Xinjiang.

83 Bloomberg (2023). China Solar Entering a Year of 'Brutal' Consolidation, GCL Says.

на повышении цен<sup>84</sup>. На сегодняшний день в топ-5 ведущих производителей поликремния входят Tongwei Solar, TBEA, GCL Technology, East Hope и Daqo Energy. В то же время на рынке присутствуют игроки «второго эшелона», такие как Asia Silicon, Lihao Semiconductor, Dongli, Risen, Tianhong Tianke, Luoyang Silicon (Рис. 36). С учетом нестабильных условий на рынке наибольшей способностью противостоять рискам обладают предприятия с вертикально интегрированной производственной цепочкой, обладающие относительной гибкостью в части распределения затрат и аккумуляирования прибыли в целях ее реинвестирования<sup>85</sup>.

Крупнейшими производителями поликремния за пределами Китая по итогам 2022 года стали Wacker Chemie, OCI, REC и Hemlock, общая производственная мощность которых достигла 156 тыс. тонн в 2022 году (Табл. 2)<sup>86, 87</sup>.

В 2021 году в США вступил в силу закон о прототворении принудительного труда уйгуров (Uyghur Forced Labor Prevention Act, UFLPA), направленный на запрет импорта товаров в США, произведенных полностью или частично с ис-

84 По итогам 2023 года даже крупнейшие китайские производители поликремния Tongwei и GCL Tech объявили о снижении прибыли.

85 Records of polysilicon rivers and lakes: the duopoly is established, and there are many strong players in the 'Warring States Kill'!

86 В 2023 году не китайские компании также столкнулись со сложностями в части производства и продаж поликремния. В частности, продажи поликремния немецкой компанией Wacker Chemie упали на 30% по сравнению с 2022 годом примерно до 1,6 млрд евро, а прибыль от производства поликремния снизилась на 61% до 321 млн евро (347 млн долл. США), что было связано со значительным ценовым давлением и высокими ценами на энергоносители в Германии.

87 PV-TECH (2024). Wacker Chemie's polysilicon division quarterly sales continue to drop in Q4 2023.

пользованием принудительного труда в Синьцзян-Уйгурском автономном районе (СУАР) Китая или в одной из «зарегистрированных» компаний (UFLPA Entity List)<sup>88, 89</sup>. Запрет также распространяется на все продукты, которые были изготовлены с применением запрещенных товаров. Импортёры поликремния должны предоставлять убедительные доказательства того, что их товары не произведены полностью или частично в СУАР либо произведены без использования принудительного труда. В 2023 году на долю Уйгурского региона приходилось около 35% мирового производства поликремния (ранее 45%) и 32% мирового производства металлургического кремния<sup>90</sup>. Во избежание экспортных ограничений со стороны США китайские компании расширили производство фотоэлектрической продукции за пределами Китая, в первую очередь во Вьетнаме. Так, в 2023 году производство кремниевых пластин во Вьетнаме компанией JA Solar было расширено с 1,5 ГВт до 4 ГВт. В начале 2022 года компания Jinko Solar запустила завод по производству солнечных пластин мощностью 7 ГВт в год, а в августе 2023 года Trina Solar мощностью 6,5 ГВт в год. Соответственно, экспорт поликремния из Китая во Вьетнам вырос почти в 8 раз с 639 тонн в 2022 году до 4970 тонн в 2023 году. Одновременно импорт поликремния в Китай, 98% которого приходится на Wacker и OCI (завод в Малайзии), в 2023 году упал до самого низкого уровня с 2011 года.

88 Public Law 117 - 78 - An act to ensure that goods made with forced labor in the Xinjiang Uyghur Autonomous Region of the People's Republic of China do not enter the United States market, and for other purposes.

89 UFLPA Entity List.

90 Sheffield Hallam University (2023). Overexposed: Uyghur Region Exposure Assessment for Solar Industry Sourcing.

Табл. 2. Крупнейшие производители поликремния за пределами Китая, тыс. т

Компания	Страна-основатель	Производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год	Размещение заводов
Wacker Chemie	Германия	80	Германия, США
OCI	Южная Корея	40	Корея, Малайзия
REC Silicon	Норвегия	18	США
Hemlock	США	18	США

Источник: данные компаний

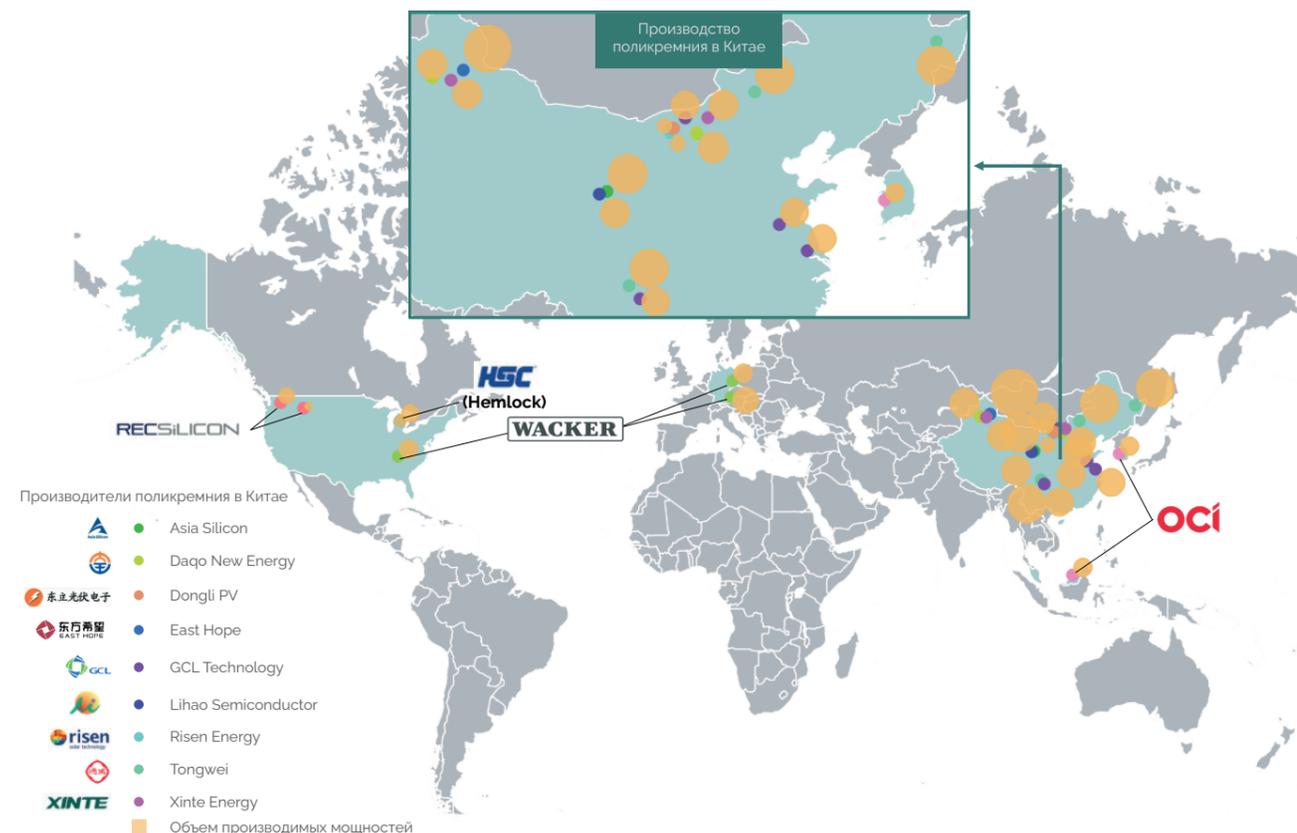
Согласно китайской таможенной статистике импорт упал на 28,5% с 88 093 т в 2022 году до 62 965 т в прошлом году<sup>91</sup>. В 2024 году данный показатель может снизиться примерно до 38 тыс. т за год.

На данный момент в Европейском союзе аналогичных строгих ограничений на импорт поликремния и компонентов оборудования для солнечной энергетики из Китая не существует. Однако расту-

щее доминирование китайской промышленности в части поликристаллического кремния и зависимость от импорта солнечной продукции из Китая стали тревожным сигналом для западных правительств, которые рассматривают меры по организации цепочки поставок элементов фотоэлектрической промышленности без участия китайских поставщиков.

91 PV-TECH (2024). Polysilicon exports to China lowest since 2011 due to US import laws — Bernreuter.

Рис. 37. Крупнейшие производители поликремния в мире по итогам 2022 года



Источник: данные компаний, APBЭ

## ДИНАМИКА ЦЕН НА ПОЛИКРЕМНИЙ

Высокая волатильность в ценообразовании на поликристаллический кремний оказывает значительное влияние на развитие фотоэлектрической промышленности. Средняя стоимость поликремния с начала 2021 года по август 2022 года увеличилась примерно в 4 раза до 40 долл. США за килограмм<sup>92</sup>, что соответствует самому высокому уровню цен с 2011 года<sup>93, 94</sup>. В 2022 году высокие цены на поликремний сохранялись по причине резкого восстановления спроса после пандемии и остановки на ее фоне ряда заводов в Китае. К началу 2023 года цены на поликремний для фотоэлектрических элементов резко снизились до уровня ниже 20 долл. США/кг, после чего в марте 2023 года цена на поликремний установилась на уровне 30 долл. США/кг (213 юаней/кг)<sup>95</sup>. Летом 2023 года цена на поликремний стремительно пошла вниз и опустилась до уровня 10 долларов за килограмм поликристаллического кремния. Осенью запуск новых производственных проектов позволил сократить дефицит предложения и сохранить цены на поликремний на относительно стабильном уровне. К концу ноября 2023 года из-за переизбытка предложения средняя цена 1 кг поликремния снизилась до уровня 8,1 долл. США (58 юаней). Пережив множество циклов взлетов и падений в течение года, 29 декабря 2023 года цены на поликремний составляли 59 юаней/кг, что на 68,8% ниже, чем 189 юаней/кг, зафиксированных 30 декабря 2022 года<sup>96</sup> (Рис. 31).

По состоянию на март 2024 года среднемировые цены на поликремний составляют примерно 9 долл. США/кг (64–69 юаней/кг). В то же время цены на поликремний не китайского происхождения соответствуют 20 долл. США/кг<sup>97</sup>.

Ожидается, что после периода стабилизации цен, который продлился до июня 2024 года, цены снова снизятся до уровня 50–55 юаней/кг<sup>98</sup>. Может возникнуть вероятность поэтапного закрытия некоторых производственных линий.

При этом спрос на не китайский поликремний также увеличивается, и некоторые страны стремятся производить поликремний на отечественном рынке. Например, принятый в США Закон о снижении инфляции предоставляет налоговую

скидку на производство поликремния в размере 3 долл. США за 1 кг «солнечного» поликремния<sup>99</sup>.

Несмотря на ожидание того, что подобные меры на определенное время смогут защитить локальные рынки от конкуренции со стороны китайских производителей, в долгосрочной перспективе локальным производственным объектам будет трудно оставаться конкурентоспособными<sup>100</sup>. Запуск заводов по производству поликремния занимает больше времени и обходится дороже, чем инвестиции в производство фотоэлектрических пластин, элементов и модулей.

## МАТЕРИАЛОЕМКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Цена поликремния отражается непосредственно на стоимости продукции по всей производственной цепочке — от кремниевых пластин до фотоэлектрических модулей. Помимо кремния, для строительства фотоэлектрических станций требуется широкий спектр материалов, начиная с бетона и стали, используемых при создании опорных конструкций, для размещения ФЭМ, заканчивая специальными полимерными компонентами (в частности, EVA пленка и полиолефин для герметизации, барьерные пленки), серебряными пастами для токопроводящих шин. Для производства модулей и проводки также требуются разные металлы: алюминий, сурьма, медь, индий, серебро, свинец и цинк.

В среднем стоимость сырья и материалов составляет около 45% от конечной стоимости солнечного фотоэлектрического модуля, производимого на основе поликристаллического кремния (Рис. 38), при этом 4% приходится на стоимость сырья и материалов при производстве самого поликремния из них около 2% — на металлургический кремний. Конечная стоимость производства поликремния соответствует 12% стоимости производства всего солнечного модуля<sup>101, 102</sup>. При двукратном росте цен на поликремний его доля в общей стоимости производства солнечного модуля будет превышать 20%, что свидетельствует о значительном влиянии стоимости исходного сырья.

Прогнозный спрос на поликремний зависит не только от дальнейшего увеличения спроса на фотоэлектрические модули, но и от их материалоемкости. За последние два десятилетия был достигнут

92 EnergyTrend (2024). Polysilicon Prices Remain High, No Moderation Until 2023.

93 BloombergNEF (2022). Solar Silicon Cost Rises for Eighth Week in Blow to Clean Energy.

94 TrendForce. PV Spot Price. URL: <https://www.energytrend.com/solar-price.html>

95 PV Tech (2023). PV Price Watch: silicon prices continue its downward trend to US\$26.2/kg.

96 SMM (2024). Silicon products and module prices plummeted in 2023. Polysilicon supply growth will slow down in 2024, installed capacity to hit a new high.

97 Infolink (2024). Polysilicon prices.

98 PV magazine (2024). Polysilicon prices further decouple, adverse factors thwart contract negotiations.

99 U.S. DOE (2023). Federal Tax Credits for Solar Manufacturers.

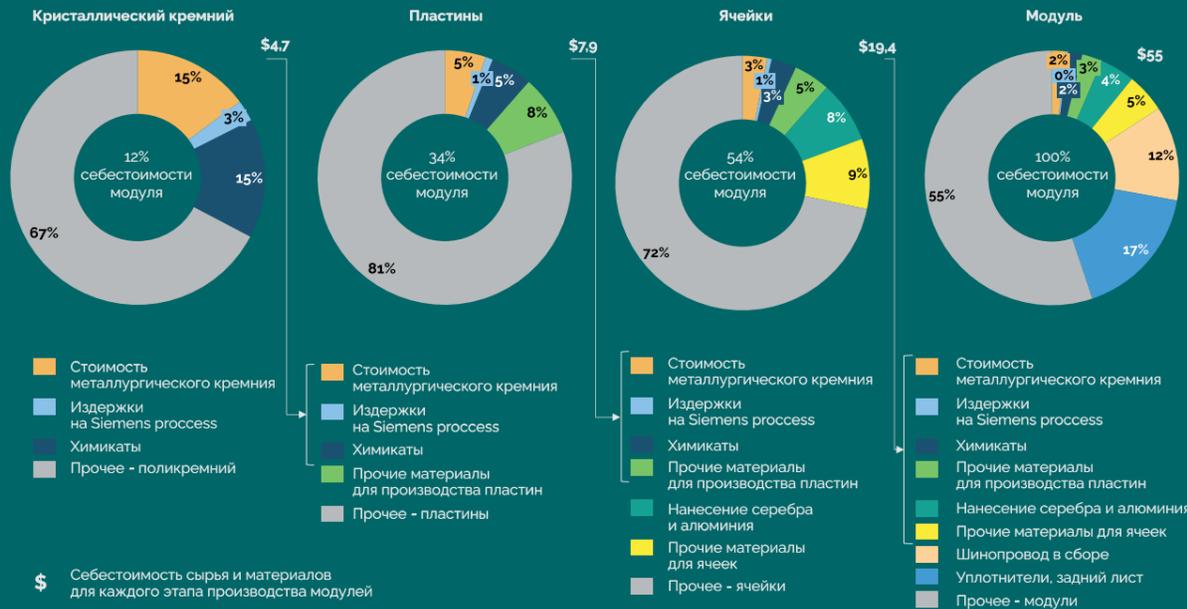
100 По некоторым оценкам, компании будут развивать мощности по производству поликремния в течение следующих трех лет, что означает продолжение зависимости от поставок кремниевых пластин. К моменту запуска построенных мощностей компаниям будет сложно оставаться конкурентоспособными по сравнению с китайскими поставщиками. MERCOM (2023). Uncovering the Promises of India's PLI Program for Solar Modules.

101 NREL (2020). Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing.

102 Данная структура затрат справедлива при примерной цене поликремния на уровне 20 долл. США/кг, характерной для 2023 года.

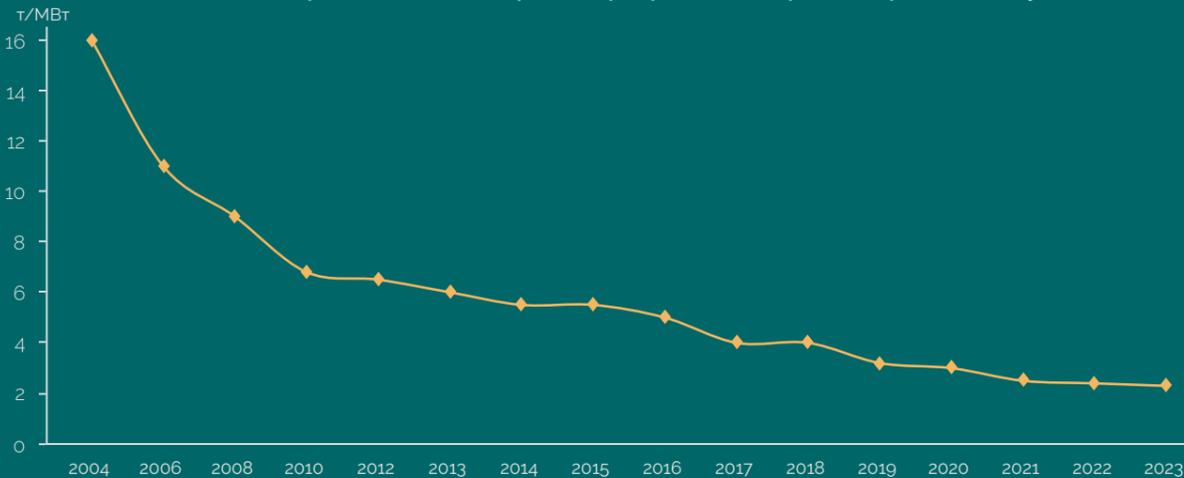


Рис. 38. Структура себестоимости на основных этапах производства солнечного модуля



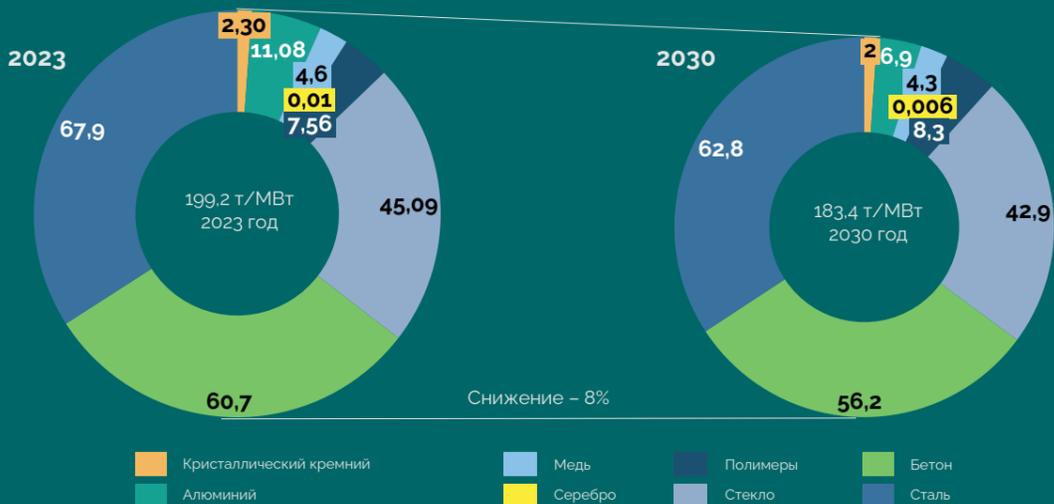
Источник: NREL.

Рис. 39. Динамика материалоемкости поликремния при производстве фотоэлектрических модулей, т/МВт



Источник: Fraunhofer ISE.

Рис. 40. Материалоемкость различных элементов, требуемых для строительства солнечных электростанций в 2023 и 2030 году, т/МВт (прогноз)



\*При более активном развитии технологии TOPCon потребление серебра может оказаться выше.

Источник: IEA, European Commission.

значительный прогресс по этому показателю: с 2006 по 2023 год его содержание в фотоэлектрических кремниевых элементах снизилось более чем в пять раз — с 16 до 2,3-2,4 т/МВт — благодаря повышению эффективности элементов, получению более тонких кремниевых пластин и использованию более крупных слитков<sup>103</sup> (Рис. 39).

До конца текущего десятилетия прогнозируется дальнейшее снижение материалоемкости поликремния примерно до 2 т/МВт, а также других элементов, необходимых для производства основных компонентов солнечных фотоэлектрических станций<sup>104</sup>.

В 2020 году для строительства 1 МВт солнечной фотоэлектрической станции на различных этапах производства требовалось совокупно около 200 т различных материалов, в том числе 2,9 т поликремния, 11,1 т алюминия, 4,6 т меди, 0,017 т серебра, 7,6 т полимеров, 45,1 т стекла, 60,7 т бетона, 67,9 т стали. При этом в 2023 году материалоемкость ФЭМ по поликремнию снизилась до 2,3 т/МВт, серебра — до 0,013 т/МВт.

К 2030 году совокупная материалоемкость солнечной фотоэлектрической станции может снизиться на 8% до 183,4 т/МВт. Наибольшее снижение прогнозируется в материалоемкости серебра — 50%, алюминия — 38%, кристаллического кремния — 13%. На Рис. 40 приведена структура материалов, необходимых для строительства 1 МВт СФЭС в 2023 и 2030 году с учетом тенденции снижения материалоемкости<sup>105, 106, 107</sup>.

Поскольку в 2023 году введены в эксплуатацию 420 ГВт СФЭС, общий объем расхода указанных материалов составил около 84 млн т. В случае сохранения текущего уровня материалоемкости элементов СФЭС для обеспечения среднегодового ввода 600 ГВт солнечных энерго мощностей, необходимых в соответствии со сценарием IRENA (1.5°C Scenario) на горизонте до 2030 года, потребуется 120 млн т основных материалов. При снижении совокупной материалоемкости до 183,4 т/МВт затраты материалов составят 110 млн т (Рис. 41).

Так как срок эксплуатации солнечных модулей составляет около 25–30 лет, ускоренные вводы СЭС в последнее десятилетие приведут к резкому увеличению объемов выводов солнечных модулей из эксплуатации за горизонтом 2040 года. Уже сейчас в мире существуют технологии переработки компонентов солнечных модулей, позволяющие получать из отслуживших модулей материалы для повторного использования. Так, дополнительный вклад в снижение требуемого объема материалов в пер-

спективе 2030–2050-х годов могут внести мощности по вторичной переработке модулей.

На сегодняшний день различные компании уже используют технологии для вторичного использования материалов из алюминиевой рамы, задней пленки и стекла от отработавших ФЭМ. В то же время процесс извлечения и восстановления поликремния, а также серебра, меди в целях их вторичного использования является более сложным и требует использования методов физической, термической и химической обработки. Переработка материалов на данном этапе развития технологии характеризуется низкой эффективностью, что с учетом высокой стоимости электроэнергии также приводит к высоким затратам на переработку<sup>108</sup>.

Ожидается, что к 2030 году эффективность переработки и вторичного использования поликремния, как и другого критического сырья, значительно возрастет. В случае, если не менее половины выводимых из эксплуатации солнечных модулей на основе кристаллического кремния смогут быть полностью переработаны, то при оценочном выводе из эксплуатации в объеме 140 ГВт в 2030 году около 0,898 млн т поликремния, 0,004 млн т серебра, 2,8 млн т алюминия, 0,5 млн т меди и 3,8 млн т стали будут пригодны для изъятия в целях повторного использования. При этом серебро, полученное при переработке выводимых из эксплуатации солнечных модулей, полностью обеспечит спрос со стороны солнечной энергетики на этот материал к 2030 году. Благодаря переработке и повторному использованию указанных материалов совокупный спрос на компоненты снизится примерно на 8% до 102 млн т (Рис. 42).

На горизонте 2030 года объемы глобальных вводов СФЭС могут оказаться значительно выше требуемых в соответствии со сценарием IRENA 1,5°C и превысить 1 ГВт в год. При растущем спросе важно также учитывать объемы производства требуемых материалов, чтобы не допустить их дефицита.

Производственных мощностей по выпуску поликремния уже достаточно для того, чтобы покрыть спрос в объеме более 1 ГВт СФЭС в год. Производству высокочистого поликремния предшествуют производство металлургического и промышленного кремния, а также добыча кварца (кварцита). На 2023 год мировое производство кварца и кварцита оценивается примерно в 5–6 млн тонн в год<sup>109</sup>. Данного объема достаточно для обеспечения годового спроса на поликристаллический кремний в солнечной промышленности даже в максимальном сценарии. Достаточность других материалов, необходимых для обеспечения годового ввода СФЭС, представлена на Рис. 43<sup>110, 111</sup>.

103 Fraunhofer ISE (2023). Photovoltaics Report.

104 Уровень снижения материалоемкости может оказаться больше в случае ускоренного развития технологий.

105 IEA (2022). Solar PV Global Supply Chains.

106 European Commission (2020). Raw materials demand for solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system.

107 IEA PVPS (2020). Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems.

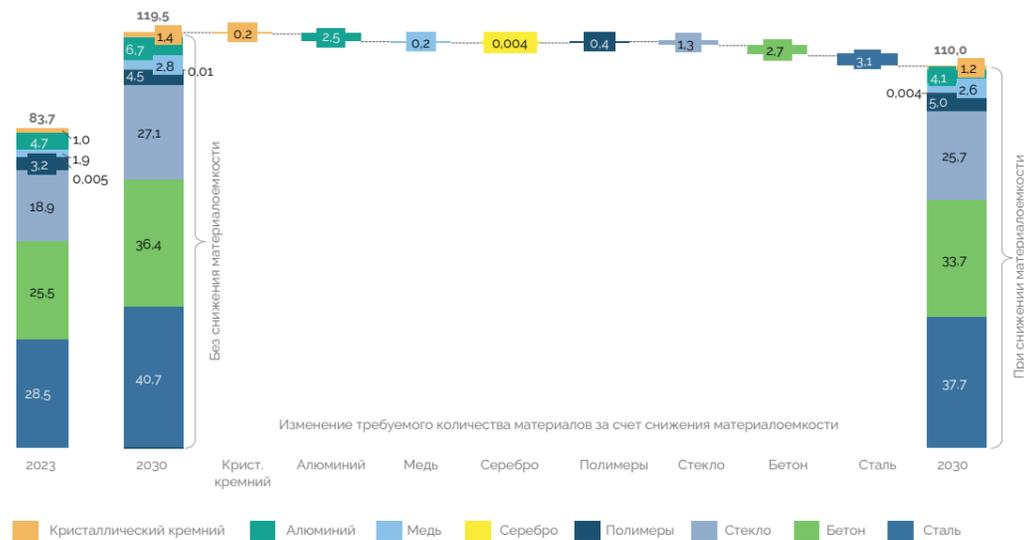
108 S. Preet, S.T. Smith (2024). A comprehensive review on the recycling technology of silicon based photovoltaic solar panels: Challenges and future outlook.

109 ISA (2023). Global Solar PV Supply Chains.

110 U.S. Geological Survey (2024). Mineral commodity summaries 2024.

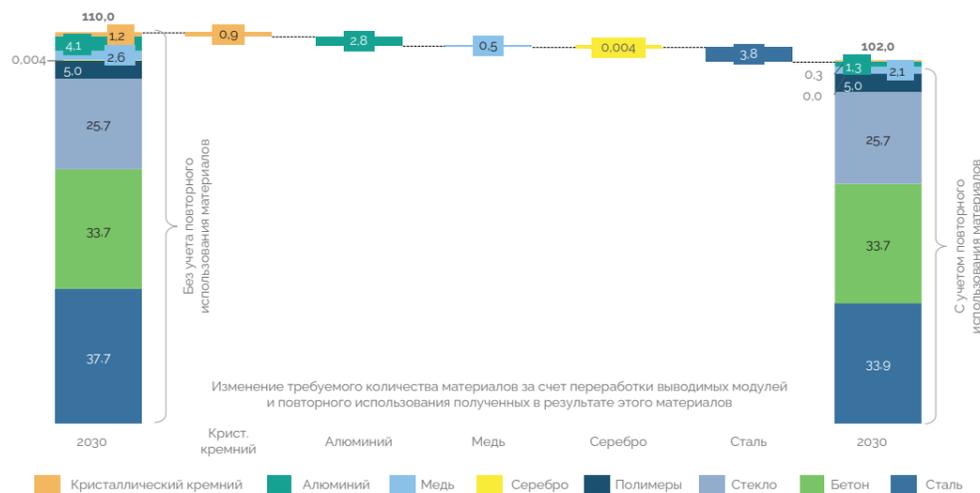
111 Mining technology (2023). Australia and Brazil to play key role in global iron ore output growth through 2030.

**Рис. 41. Совокупный объем материалов, требуемых для обеспечения годового ввода СФЭС при различных уровнях материалоемкости, млн т**



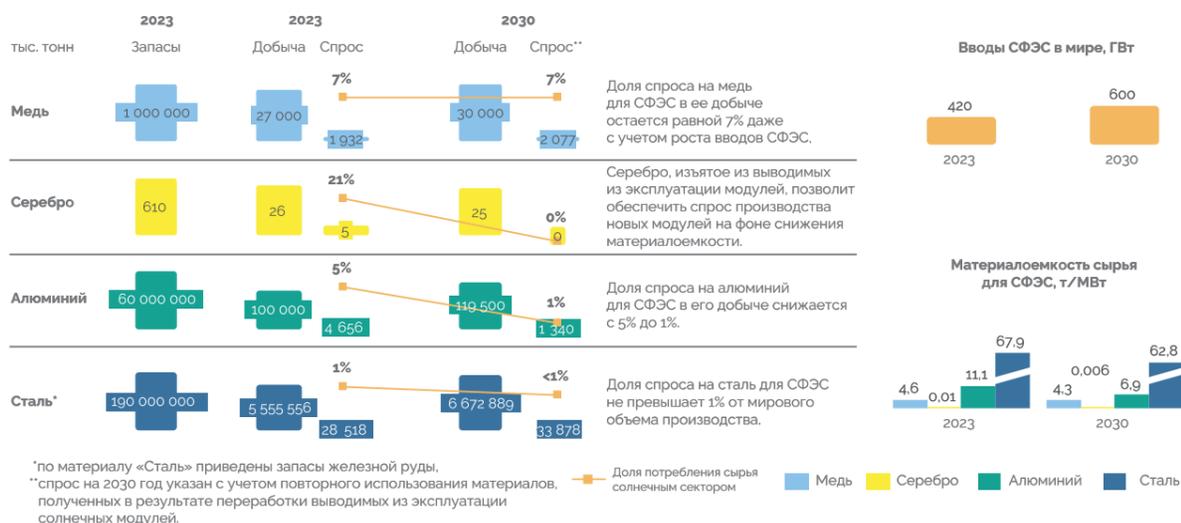
Источник: IEA, European Commission, APBЭ

**Рис. 42. Совокупный объем материалов, требуемых для обеспечения годового ввода СФЭС в 2030 году с учетом повторного использования материалов, млн т**



Источник: IEA, European Commission, APBЭ

**Рис. 43. Изменение спроса на ключевые материалы, помимо поликремния, потребляемые сектором солнечной энергетики**



Источник: U.S. Geological Survey, Mining technology, APBЭ

В соответствии с данными по имеющимся мировым запасам меди, серебра, алюминия, железной руды (для стали), а также по плановым объемам их добычи в 2030 году доля потребления сектором солнечной энергетики в общем объеме добычи сохранится для меди и стали и будет снижаться для серебра и алюминия за счет уменьшения материалоемкости компонентов, а также их вторичного использования в результате переработки. Соответственно, развитие солнечной энергетики не станет важным фактором в формировании дефицита указанных материалов в горизонте до 2030 года.

Риск возникновения дефицита меди возможен в случае не менее чем двукратного роста объема ввода СФЭС к 2030 году — примерно до 1 200 ГВт, в данном случае доля потребления меди солнечной энергетикой в ее добыче увеличится до 15%.

### РЫНОК ПОЛИКРЕМНИЯ В РОССИИ

На территории Российской Федерации поликремний не производится. Этим обусловлена полная зависимость российской микроэлектроники и фотоэлектрической энергетики от поставок поликремния зарубежными производителями.

В 2011 году ООО «Группа НИТОЛ» планировало реализовать инвестиционный проект по строительству первого в России завода по производству поликристаллического кремния мощностью 5 тыс. т/год, однако впоследствии было принято решение об отмене проекта.

Учитывая наличие потенциальных рисков ограничения доступа к рынку поликремния, в том числе логистических и геополитических, на сегодняшний день вопрос создания собственного производства высококачественного поликристаллического кремния в России приобретает новое значение. Успешное функционирование завода по производству

солнечных модулей на базе гетероструктурной технологии (производство ведется с 2017 года), а также открытие в России с 2024 года производства кремниевых пластин и фотоэлектрических ячеек создают предпосылки для того, чтобы в России развивался комплексный промышленный кластер по всей цепочке производства солнечных модулей.

Еще одним положительным аспектом развития национального производства поликремния является снижение зависимости от импорта на фоне оживающего санкционного давления, волатильности цен на мировом рынке поликремния, а также реализации экспортного потенциала российской промышленности на фоне прогнозируемого роста объемов мирового рынка солнечной энергетики.

Производственная мощность завода «Энкор» составляет 1,3 ГВт кремниевых пластин и 1 ГВт фотоэлектрических ячеек в год. Потенциал производства солнечных модулей на заводе ООО «Хевел» на основе собственных компонентов также составляет около 1 ГВт/год, что соответствует необходимости производства не более 2,5 тыс. т высококачественного поликремния.

Сейчас минимальная производственная мощность заводов, выпускающих поликремний, в других странах составляет не менее 10 тыс. т/год, что в 4 раза превышает максимально возможный спрос на «солнечный» поликремний в России.

С учетом того, что на глобальном рынке производителей поликремния могут остаться только крупнейшие игроки (преимущественно в Китае), целесообразным может быть развитие межнационального проекта по производству поликремния, удовлетворяющего спрос сразу нескольких национальных рынков. Примером подобного проекта может стать реализация совместного производства для стран ЕАЭС.

Поликремний является ключевым материалом при изготовлении солнечных элементов из кристаллического кремния — самой распространенной технологии солнечной энергетики. Кроме того, используется такое важное сырье, как медь, алюминий, железная руда (для стали) и серебро, формирование дефицита которых из-за развития солнечной энергетики регулярно прогнозируется разными организациями.

Существующих мощностей по производству поликремния сегодня достаточно для обеспечения требуемых вводов солнечной генерации на горизонте до 2050 года.

По итогам 2023 года глобальная установленная мощность производств поликристаллического кремния достигла 2256 тыс. т/год (годовой прирост около 70%), что соответствует потенциальному вводу около 1000 ГВт СФЭС. При этом фактический объем мирового производства поликремния в 2023 году составил 1600 тыс. т.

К концу 2023 года число действующих производителей поликремния во всем мире увеличилось до 25; 16 из них в Китае и 9 — в других странах мира. 93% всех мировых мощностей по производству поликремния расположены на территории Китая, обеспечившего выпуск 1,4 млн т поликремния в 2023 году. В 2024 году ожидается, что производство поликремния в Китае превысит 2,1 млн т.

В течение 2024 — первой половины 2025 года число производителей поликремния в Китае может сократиться на 25%. На рынке поликремния будут продолжать лидировать несколько крупных игроков, которые давно присутствуют на рынке и активно развивались на фоне повышения цен (топ-5 лидеров являются китайскими компаниями: Tongwei Solar, TBEA, GCL Technology, East Hope и Daqo Energy).

С ростом темпов развития мировой солнечной энергетики и полупроводниковой промышленности компании в других странах, в частности, в Германии, Малайзии и США, так же постепенно наращивают свои производственные мощности по выпуску поликремния.

Инвестирование в развитие производства поликремния за пределами Китая целесообразно при наличии достаточного объема спроса на локальных рынках и реализации протекционистских мер, в том числе жестких требований по локализации.

Индия и США уже сосредоточены на снижении своей зависимости от импорта и наращивании внутреннего производственного потенциала, который, как ожидается, покроет 35% спроса солнечной энергетики в Северной Америке и значительно превысит локальный спрос в Индии к 2028 году, открывая экспортные возможности. Европа к 2028 году достигнет лишь 10% самообеспеченности в производстве фотоэлектрической продукции, оставаясь крупнейшим импортером китайских компонентов<sup>112</sup>.

Несмотря на растущие объемы ежегодных вводов СФЭС, благодаря снижению материалоемкости и развитию технологий переработки отслуживших СФЭС значительное увеличение спроса на медь, алюминий, серебро и сталь и, соответственно, риск дефицита этих материалов в солнечной энергетике в ближайшее десятилетие не ожидается. К 2030 году доля потребления сектором солнечной энергетики в общем объеме добычи сохранится для меди и стали и значительно снизится для серебра и алюминия за счет уменьшения материалоемкости компонентов, а также их вторичного использования в результате переработки.

112 SolarQuarter (2024). Global Solar PV Manufacturing Capacity Projected to Hit 1,100 GW by 2024 and 1,300 GW by 2028, Surpassing Demand.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с рекордным спросом на солнечную генерацию, наблюдающимся в последние годы, мировые мощности по производству фотоэлектрической продукции ежегодно растут. Значительное влияние на активный рост сектора солнечной энергетики в мире оказала политика Китая, благодаря которой в данной стране уже созданы производственные мощности по всей цепочке поставок фотоэлектрической промышленности, достаточные для обеспечения мирового спроса на 100% на горизонте до 2030 года.

По итогам 2023 года на территории Китая размещены более 80% всех глобальных производственных мощностей по выпуску фотоэлектрических модулей (861 ГВт), 98% — по выпуску кремниевых пластин (892 ГВт) и около 93% — по выпуску поликремния (2,1 млн т, соответствует потенциальному вводу более 900 ГВт СФЭС). Поскольку даже в течение следующего десятилетия доля Китая в мировом объеме производства и экспорта фотоэлектрической продукции все так же сохранится на высоком уровне, его политика продолжит оказывать сильнейшее влияние на цены ФЭМ, пластин и поликремния по всему миру. Только в 2023 году Китай инвестировал более 130 млрд долл. США в отечественную фотоэлектрическую промышленность.

При этом растущее доминирование китайской промышленности и зависимость от импорта солнечной продукции из Китая (90% мирового экспорта ФЭМ и 99% мирового экспорта кремниевых пластин в 2023 году обеспечены Китаем) стали для отдельных стран сигналом для активного развития отечественного производственного сектора в солнечной энергетике. Подобные инициативы в целях реализации протекционистской политики, направленной на локализацию всех этапов в цепочке производства солнечных модулей, в том числе производства высокого передела — ячейки, пластины уже реализуются в США (меры стимулирования в виде налоговых льгот предоставляются локализованным производствам поликремния, пластин, ячеек, модулей в рамках Закона о снижении инфляции — IRA), Индии (создание полной производственной цепочки высокоэффективной фотоэлектрической продукции в рамках программы поддержки локализованного производства — PLI). В странах Европейского союза также рассматриваются меры по организации цепочки поставок элементов фотоэлектрической промышленности без участия китайских поставщиков.

В Индии уже наблюдается постепенное наращивание производственных мощностей по выпуску солнечных модулей (6% от общемирового показателя в 2023 году), при этом в стране еще нет ни одного завода по производству поликремния, поставщиком

поликремния в среднесрочной перспективе, вероятно, останется Китай<sup>113</sup>. В США, несмотря на наличие налоговых льгот по всей цепочке производства, производители также преимущественно сосредоточились на сборке солнечных модулей, и лишь две компании объявили о планах производства слитков и пластин<sup>114</sup>.

Несмотря на значительные усилия национальных властей данных стран по локализации производства, ценовой и технологический разрыв с китайскими конкурентами продолжит увеличиваться<sup>115</sup>. Однако страны не отказываются от обозначенных планов и предпринимают дополнительные меры, способствующие развитию производственного сектора. Например, в США на сегодняшний день в целях достижения импортонезависимости от Китая по всей цепочке поставок и устранения сложившегося дисбаланса в части производства различных компонентов (ставка на сборку ФЭМ) рассматривается повышение уровня налоговых льгот. При этом в Китае лидирующие компании солнечной промышленности являются, как правило, вертикально интегрированными и охватывают большую часть производственной цепочки: пластины, ячейки и солнечные модули.

В России созданные производства пластин, ячеек (ООО «ЭнКОР Групп») и солнечных модулей (ООО «Хевел») оказывают значительный эффект в части формирования технологического суверенитета и дальнейших перспектив для эффективного развития отрасли солнечной энергетики в стране. Производство наиболее наукоемких компонентов для солнечной энергетики способствует повышению конкурентоспособности российской продукции на международных рынках, а также хеджированию риска изменения цен на волатильном рынке компонентов.

На мировом рынке поликремния также лидируют несколько крупных игроков, которые давно присутствуют на рынке и активно развивались на фоне повышения цен. С ростом темпов развития мировой солнечной энергетики и полупроводниковой промышленности компании помимо

113 Для достижения целевого показателя 280 ГВт СЭС к 2030 году Индии необходимо ежегодно вводить в среднем 30 ГВт солнечных энерго мощностей на данном горизонте.

114 PV Tech (2024). Strengthening US solar manufacturing: the case for including domestically produced wafers in domestic content incentives. QCells и Norsun объявили о планах по производству слитков и пластин общей мощностью 8 ГВт, что составляет менее 15% от запланированной мощности модулей.

115 Solar Power World (2024). Despite solar investments in US and India, China still controls 80% of global manufacturing capacity.

Китай, — ряд стран, в частности Германия, Малайзия и США, постепенно наращивает свои производственные мощности по выпуску поликремния.

При этом на сегодняшний день минимальные мощности заводов по производству «солнечного» поликремния в странах мира составляют около 10 тыс. т/год, что эквивалентно производству около 4 ГВт фотоэлектрических модулей. На территории России производственный комплекс ООО «ЭнКОР Групп» позволит обеспечить годовой выпуск 1,3 ГВт кремниевых пластин и 1 ГВт фотоэлектрических ячеек. Соответственно, потребность в поликремнии для фотоэлектрической промышленности не превышает 2,5 тыс. т, что в 4 раза меньше минимальной производственной мощности заводов, выпускающих поликремний в других странах, и может быть недостаточна для создания конкурентоспособного отечественного производства поликремния. Инвестирование в развитие производства поликремния за пределами Китая целесообразно лишь при наличии достаточного объема спроса на локальных рынках и реализации протекционистских мер, в том числе жестких требований по локализации.

Несмотря на растущие объемы ежегодных вводов СФЭС, благодаря снижению материалоемкости и развитию технологий переработки отслуживших СФЭС значительное увеличение спроса на медь,

алюминий, серебро и сталь и, соответственно, риск дефицита этих материалов в солнечной энергетике в ближайшее десятилетие не ожидаются. К 2030 году доля потребления сектором солнечной энергетики в общем объеме добычи сохранится для меди и стали и значительно снизится для серебра и алюминия за счет уменьшения материалоемкости компонентов, а также их вторичного использования в результате переработки.

В текущем десятилетии Китай сохранит свое мировое лидерство как в развитии мощностей по производству компонентов для солнечной энергетики, так и по темпам строительства генерирующих объектов. В то же время другие страны мира, нацеленные на создание собственных производств фотоэлектрической продукции, не отказываются от своих планов и стремятся обеспечить технологический суверенитет. На данный момент доля российских производственных мощностей по выпуску солнечных модулей, пластин и ячеек на мировом рынке не превышает 0,1%, но, несмотря на это, локализованное производство играет ключевую роль в формировании национальных компетенций на перспективном быстрорастущем рынке, а также способствует хеджированию национальной отрасли от конъюнктурных колебаний и геополитических рисков.

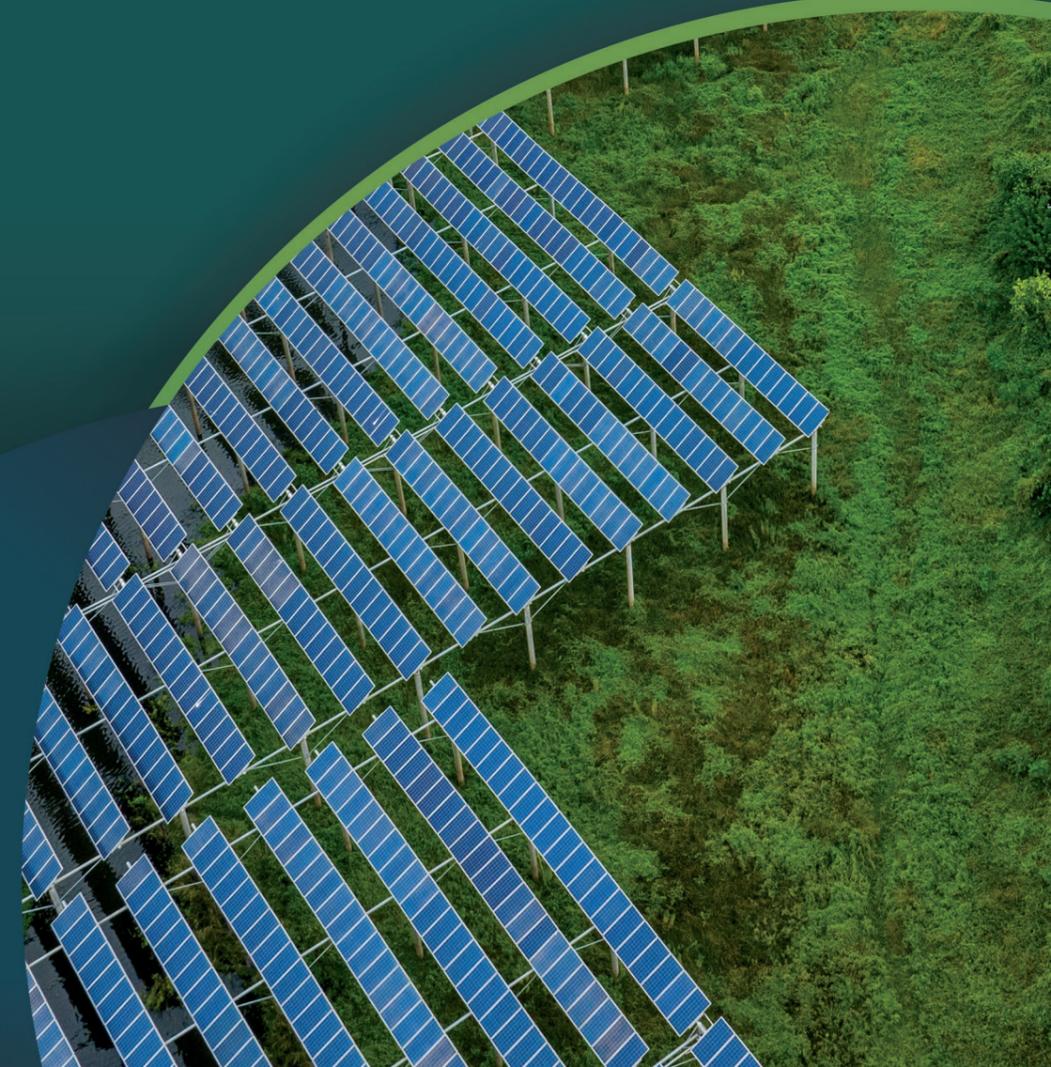


## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АРВЭ	Ассоциация развития возобновляемой энергетики
АТР	Азиатско-Тихоокеанский регион
АТС	Администратор торговой системы оптового рынка электроэнергии и мощности
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
Вт	Ватт
ВЭС	Ветроэлектростанция
ГВт	Гигаватт
ГЭС	Гидроэлектростанция
ДПМ ВИЭ	Договор о предоставлении мощности ВИЭ
ЕАЭС	Евразийский экономический союз
кВт	Киловатт
КПД	Коэффициент полезного действия
МВт	Мегаватт
МВт·ч	Мегаватт-час
НИОКР	Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
СМР и ПНР	Строительно-монтажные и пуско-наладочные работы
СНГ	Содружество Независимых Государств
СО ЕЭС	Системный оператор Единой энергетической системы
СУАР	Синьцзян-Уйгурский автономный район
СФЭС	Солнечная фотоэлектрическая станция
СЭС	Солнечная электростанция
ТВт	Тераватт
ФЭМ	Фотоэлектрический (солнечный) модуль
BoS	Компоненты фотоэлектрической станции, кроме фотоэлектрических модулей (Balance of System)
СОР28	Конференция сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата (Conference of the Parties)
СРІА	Китайская ассоциация фотоэлектрической промышленности (China Photovoltaic Industry Association)
СSP	СЭС, вырабатывающие электроэнергию за счет технологии концентрации солнечной энергии (Concentrated Solar Power)
EVA пленка	Полимерная пленка (этиленвинилацетат)
IEA, МЭА	Международное энергетическое агентство (International Energy Agency)
IRA	Закон о снижении инфляции США (Inflation Reduction Act)
IRENA	Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (International Renewable Energy Agency)
ISA	Международный солнечный альянс (International Solar Alliance)
LCOE	Средневзвешенная нормированная стоимость производства электроэнергии (Levelized Cost of Electricity)
NREL	Национальная лаборатория США по изучению возобновляемой энергии (National Renewable Energy Laboratory)
PLI	Схема стимулирования производства в Индии (Production Linked Incentive)
SMM	Шанхайская биржа металлов (Shanghai Futures Exchange)
UFLPA	Закон США о предотвращении принудительного труда уйгуров (Uyghur Forced Labor Prevention Act)
US DOE	Министерство энергетики США (United States Department of Energy)

# 05

## ПРИЛОЖЕНИЯ



Классификация солнечных фотоэлектрических элементов, объединяемых в фотоэлектрическом модуле, по технологиям их производства представлена в Табл. 3.

Табл. 3. Классификация солнечных элементов по технологии производства

Технология	Описание	Максимальный КПД <sup>116</sup>	Преимущества	Недостатки
Солнечные элементы из кристаллического кремния				
Солнечный элемент из монокристаллического кремния (Mono-Si)	В основе технологии лежит использование монокристаллического кремния особой чистоты одинаковой формы и ориентации.	26,7% (26,9% – Mono-Si TOPCon)	Наиболее коммерчески эффективная и развитая технология с высоким КПД.	Более высокая стоимость относительно элементов Multi-Si.
Солнечный элемент из поликристаллического кремния (Multi-Si)	Технология, использующая множество разнонаправленных небольших кристаллов без создания однородной структуры.	24,4%	Более низкая стоимость относительно элементов Mono-Si.	Более низкая эффективность относительно элементов Mono-Si.
Солнечный элемент с гетеропереходом (heterojunction, HJT)	Гетероструктурная технология, использующая монокристаллические кремниевые пластины, покрытые с двух сторон тонкой пленкой аморфного кремния.	26,8% (27,1% – HJT back-contact cell, солнечный элемент с гетеропереходом и тыльным контактом)	- Низкий температурный коэффициент <sup>117</sup> ; - Высокая эффективность.	Высокая стоимость.
(27,1% – HJT back-contact cell.				
Солнечный элемент из аморфного кремния (a-Si)	Технология выражается в напылении аморфного кремния тонким слоем на гибкую основу.	16,5%	- Меньший расход материалов; - Более низкий температурный коэффициент относительно элементов из кристаллического кремния.	Более низкий КПД относительно элементов из кристаллического кремния.
Солнечный элемент на основе теллурида кадмия (CdTe)	Элементы CdTe изготавливаются путем нанесения тонких слоев теллурида кадмия (CdTe) и сульфида кадмия (CdS) на подложку.	22,1%	- Низкая себестоимость производства; - Быстрый процесс производства; - Высокий уровень поглощения; - Большие перспективы для распространения в мире.	Наиболее токсичные среди тонкопленочных элементов.
Солнечный элемент на основе меди, индия, галлия и селена (CIGS)	В качестве полупроводникового материала элементов CIGS используется селенид меди, индия, галлия.	23,6% (12–14% – в реальных условиях)	- Низкий температурный коэффициент; - Высокий уровень поглощения.	Более высокая стоимость относительно элементов из кристаллического кремния.
Солнечный элемент на основе меди, цинка, олова и селена (CZTS)	В качестве поглощающего слоя на слой молибдена наносится тонкая пленка CZTS (соединение на основе меди, цинка, олова и серы).	13%	Производство с применением широко распространенных металлов, что делает их более легкими для масштабирования.	Низкий КПД.

<sup>116</sup> Для ряда представленных технологий приведены показатели КПД, достигнутые в лабораторных условиях.

<sup>117</sup> Температурный коэффициент — это процент снижения эффективности солнечного модуля при повышении температуры воздуха на каждый градус Цельсия.

Солнечный элемент на основе фосфида галлия-индия (InGaP)	Фосфид галлия-индия (InGaP) применяют в тандеме с арсенидом галлия (GaAs) для создания многопереходных элементов с высокой эффективностью и низкой массой.	39,5%	Один из наиболее высоко-КПД среди тонкопленочных элементов.	- Высокая стоимость; - Узкий спектр использования – преимущественно в космосе.
Солнечный элемент на основе арсенида галлия (GaAs)	Арсенид галлия используется в тандеме с другими материалами для создания многослойных высокопроизводительных элементов. Могут применяться вместе с солнечными концентраторами, которые фокусируют солнечное излучение на большое количество фотоэлементов.	32,9% (42,3% – triple-junction metamorphic cell, солнечный элемент с тремя переходами)	Один из наиболее высоко-КПД среди тонкопленочных элементов.	- Высокая стоимость; - Наиболее эффективны в аэрокосмической промышленности.
<b>Прочие технологии</b>				
Сенсибилизированный красителем солнечный элемент (DSSC)	Элементы DSSC используют механизм фотосенсибилизации (высокой чувствительности к ультрафиолетовым лучам) для преобразования падающего света в электроэнергию.	13%	- Возможно преобразование в электроэнергию как естественного, так и искусственного света; - Способность работать в условиях низкой освещенности, простота производства.	- Невысокий КПД среди тонкопленочных элементов; - Работа элемента при очень высоких и низких температурах ограничена.
Солнечный элемент с квантовыми точками (QDSC)	Элементы QDSC используют квантовые точки («искусственные атомы») в качестве поглощающего фотоэлектрического материала.	18,1%	Перспективная и развивающаяся технология.	Для увеличения КПД технологии требуются исследования и разработки.
Перовскитный солнечный элемент (Perovskite)	Перовскитный элемент оснащен поглощающим слоем из материала особой кристаллической структуры. В составе перовскитных элементов применяют материал на основе галогенидов свинца или олова.	25,8% (33,9% – perovskite-silicon tandem, солнечные элементы на основе перовскита и кремния)	- Конкурентный КПД при гораздо меньшей стоимости относительно дорогих тонкопленочных элементов; - Наиболее перспективны с точки зрения увеличения КПД.	- Высокая деградация и низкая долговечность; - Ограниченный срок службы.
Органический солнечный элемент (Organic)	Поглощающий слой органического солнечного элемента выполнен органическими полимерными полупроводниками.	19,3% (13,1% – в реальных условиях)	- Низкий температурный коэффициент; - Недорогое решение по сравнению с тонкопленочными элементами; - Перспективы использования в интегрированных в здания ФЭМ.	- Невысокий КПД; - Технически незрелая технология; - Срок эксплуатации ограничен 6–10 годами.

Источник: NREL\*, US DOE\*\*, JinkoSolar, LONGi, учебное пособие «Развитие возобновляемой энергетики в России: технологии и экономика».

\* NREL (2023). Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart.  
\*\* U.S. Department of Energy (2023). Photovoltaics.

По мере развития технологий производства фотоэлектрических элементов, характеризующихся различными показателями КПД, производители дополнительно разрабатывают и внедряют технологии повышения эффективности фотоэлектрических модулей в целях продажи наиболее коммерчески жизнеспособных решений с наибольшими объемами производства электроэнергии (**Табл. 4**).

**Табл. 4. Технологии повышения эффективности фотоэлектрических модулей**

Технология	Описание
Разрезанные солнечные элементы (Split cells, Half-cut)	Технология предусматривает разрезание солнечных элементов на части (чаще всего пополам – технология Half-cut). За счет этого уменьшается путь протекания токов, что позволяет снизить резистивные потери. При затенении одной части ФЭМ из таких элементов вторая половина работает без потери мощности, что приводит к увеличению выработки электроэнергии.
Двусторонние солнечные модули (Bifacial)	Двусторонние модули могут полезно использовать солнечное излучение, падающее на них не только с лицевой стороны, но и с тыльной (отраженное солнечное излучение), что способствует увеличению выработки модуля. Для этого заднюю сторону таких модулей делают прозрачной.
Солнечный элемент с контактами к тыльной поверхности в виде чередующихся полос (IBC, Interdigitated Back Contact)	В солнечных элементах создается сетка из 30 и более проводников, которые соединяются с задней частью солнечного элемента. В отличие от обычных солнечных элементов, в которых есть видимые токосъемные шины, в IBC элементах передняя поверхность солнечного элемента полностью свободна от затенения токопроводящими элементами. За счет этого достигается повышение КПД солнечного элемента.
Солнечный элемент с диэлектрическим слоем на задней стороне (PERC, Passivated Emitter Rear Cell)	Технология предполагает нанесение диэлектрического слоя на заднюю часть солнечного элемента, который помогает отражать проходящий через него свет обратно вовнутрь элемента, поэтому он может генерировать больше свободных электронов.
Солнечный элемент с туннельно-пассивированным оксидным контактом (TOPCon, Tunnel Oxide Passivated Contact)	Технология TOPCon выполняется посредством интеграции тонкого оксидного слоя между поликремнием и базовым кристаллическим кремнием в составе солнечного элемента. В результате повышается эффективность фотоэлемента при минимальных дополнительных затратах.

Источник: pv-magazine, NREL.

## Приложение 2

### КРУПНЕЙШИЕ КОМПАНИИ — ПРОИЗВОДИТЕЛИ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ

LONGi Green Energy Technology Co. Ltd.			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	
No.8369 Shangyuan Road, Economic and Technological Development Zone, Xi'an, Shaanxi, China	2000	Кремниевые слитки, пластины, ячейки, модули	
Компания LONGi является одним из мировых лидеров по производству солнечных модулей, активно развивает водородные технологии и поставляет солнечные пластины и ячейки. Заводы по производству солнечных модулей компании LONGi располагаются в 8 регионах Китая – Тайчжоу, Хайнань, Сиань, Сяньян, Чучжоу, Цзясин, Датун, Цюйчжоу, а также во вьетнамском регионе Бак Джанг.			
Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год	Фактическое производство модулей в 2022 году, ГВт (прирост к 2021 году, %)	Объем продаж модулей в 2022 году, ГВт (прирост к 2021 году, %)	Выручка от продажи модулей в 2022 г., млрд долл. США
85	48,2	46,76	11,19
Планы компании на будущее			
Longi планирует открыть завод по производству солнечных модулей мощностью 5 ГВт в США.			

Jinko Solar			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	
No.1, Lane 1466, Shenchang Road, Minhang District, Shanghai, China	2006	Кремниевые слитки, пластины, ячейки, модули	
Компания Jinko Solar входит в тройку лидеров по поставкам солнечных модулей. Компании принадлежат заводы по производству солнечных модулей в китайских населенных пунктах Хэфэй, Шанграо, Хайнинг, Юйхуань, Чучжоу, а также в малазийском регионе Пенанг и американском Джексонвиле.			
Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год	Фактическое производство модулей в 2022 году, ГВт (прирост к 2021 году, %)	Объем продаж модулей в 2022 году, ГВт (прирост к 2021 году, %)	Выручка от продажи модулей в 2022 г., млрд долл. США
56,2	40	44,5	11,63
Планы компании на будущее			
JinkoSolar объявила о строительстве вертикально интегрированного завода по производству оборудования для солнечной энергетики мощностью 56 ГВт в провинции Шаньси, Китай. Завод будет производить в том числе солнечные модули.			

Trina Solar		
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция
No.2 Tianhe Road, Trina PV Industrial Park, Xinbei district, Jiangsu, China	1997	Кремниевые слитки, пластины, ячейки, модули
Компания является одним из лидеров по производству солнечных модулей. Заводы компании по производству солнечных модулей расположены в китайских населенных пунктах Иу, Синин, Суцзянь, Яньчэн, Хуайань, вьетнамском населенном пункте Тхай Нгуем и тайском Районге.		
Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год	Фактическое производство модулей в 2022 году, ГВт (прирост к 2021 году, %)	Объем продаж модулей в 2022 году, ГВт (прирост к 2021 году, %)
57,6	45,4	43,1
Планы компании на будущее		
Trina Solar разворачивает парк грузовиков под брендом Trina для доставки своих фотоэлектрических модулей в США.		

JA Solar		
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция
JA Solar Marketing Center No. 36, Jiangchang Third Road, Shanghai Northern Industrial Park, Zhabei District, Shanghai	2005	Кремниевые слитки, пластины, ячейки, модули
Заводы компании по производству солнечных модулей расположены в китайских населенных пунктах Фэнсянь, Хэфэй, Нинцзинь, Синтай.		
Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год	Фактическое производство модулей в 2022 году, ГВт (прирост к 2021 году, %)	Объем продаж модулей в 2022 году, ГВт (прирост к 2021 году, %)
50	43,9	39,8
Планы компании на будущее		
JA Solar объявила о плане строительства завода в Ордосе (Китай) с годовой производственной мощностью 30 ГВт слитков, 10 ГВт кремниевых пластин и 10 ГВт модулей. Общий объем инвестиций составляет около 6,02 миллиарда юаней (870,1 миллиона долларов США).		

Canadian Solar		
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция
No.2 Tianhe Road, Trina PV Industrial Park, Xinbei district, Jiangsu, China	2001	Солнечные модули, системы накопления энергии
Заводы компании по производству солнечных модулей расположены в китайских населенных пунктах Чаншу, Яньчэн, Цзясин, Суцзянь, а также во вьетнамском Хайфоне и тайском Чонбури.		
Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год	Фактическое производство модулей в 2022 году, ГВт (прирост к 2021 году, %)	Объем продаж модулей в 2022 году, ГВт (прирост к 2021 году, %)
32,7	21,1	21,1

Планы компании на будущее
Canadian Solar обнародовал свою дорожную карту по производству солнечных модулей на 2024 год, стремясь увеличить производственную мощность модулей более чем на 40 ГВт.

Green Wing Solar Technology			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год
Bac Ninh, Vietnam	2015	Солнечные модули	1,5
Завод компании по производству модулей расположен в Бак Нинх, Вьетнам.			

Hanwha Q Cells			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год
Seoul, South Korea	1999	Солнечные ячейки, модули	12
Заводы компании по производству солнечных модулей расположены в малазийском Кибержайя, американском Далтоне китайском Цидуне.			

Maxeon Solar Technologies			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год
8 Marina Boulevard #05-02 Marina Bay Financial Centre Singapore	1985	Солнечные ячейки, модули	2,5
Заводы компании по производству солнечных модулей расположены в мексиканских районах Мексикали и Энсенада.			

Vikram Solar			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год
8 <sup>th</sup> Floor, 1865, Rajdanga Main Road, Kolkata – 700107, West Bengal, India	2005	Солнечные модули	2,5
Заводы компании по производству солнечных модулей расположены в индийских Канчипураме и Фальта.			

ООО «Хевел»			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год
Чувашская Республика, г. Новочебоксарск, Шоршельский пр-д, 12	2009	Солнечные модули	0,34
ООО «Хевел» предоставляет комплекс услуг – от производства солнечных фотоэлектрических модулей до строительства «под ключ» солнечных электростанций. С 2017 года завод «Хевел» выпускает солнечные модули по гетероструктурной технологии.			

Планы компании на будущее
В 2024 году на заводе прошел пятый этап модернизации производства, направленный на расширение линейки выпускаемой высокотехнологичной конкурентоспособной в России и за рубежом продукции из фотоэлектрических преобразователей по технологии гетероперехода (HJT). В результате модернизации производственная мощность завода составляет 669 МВт ФЭМ в год.

Крупнейшие производители кремниевых пластин в Китае

TCL Zhonghuan			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год
12 Haitai East Road Huayuan Industrial Park Tianjin, 300384 China	1988	Кремниевые слитки, пластины, ячейки, модули	140
Компания производит пластины размера G12 и другие. У компании 4 завода по производству кремниевых пластин, они расположены в китайских населенных пунктах Хух-Хото, Тяньцзинь, Иньчуань, Исин.			
Планы компании на будущее			
Компания планирует строительство завода по производству сверхтонких поликремниевых пластин мощностью 35 ГВт в Гуанчжоу, провинция Гуандун.			

Jinko Solar			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год
No.1, Lane 1466, Shenchang Road, Minhang District, Shanghai, China	2006	Кремниевые слитки, пластины, ячейки, модули	65
Компании принадлежат заводы по производству солнечных пластин в китайских населенных пунктах Синьюань, Чжуншань, Синин, Утунцяо, Шанжао, а также во вьетнамском Сонг Хоай.			
Планы компании на будущее			
Jinko Solar объявила о плане строительства завода мощностью 56 ГВт в провинции Шаньси. Завод будет производить в том числе кремниевые пластины, стоимость проекта составляет 7,87 млрд долларов.			

JA Solar			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год
No. 36, Jiangchang Third Road, Shanghai Northern Industrial Park, Zhabei District, Shanghai	2005	Кремниевые слитки, пластины, ячейки, модули	40
Заводы компании по производству солнечных пластин расположены в китайских населенных пунктах Баотоу, Ляньюньган, Санхе и вьетнамском Вьет Ен.			
Планы компании на будущее			
JA Solar объявила о планах по расширению производственных мощностей по производству пластин на 20 ГВт.			

GCL Poly			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год
Unit 1703B-1706, Level 17 International Commerce Centre 1 Austin Road West, Hong Kong	1996	Поликремний, кремниевые слитки, пластины	50
Заводы компании по производству пластин расположены в китайских населенных пунктах Тайцан, Янчжоу, Уси, Сучжоу.			
Планы компании на будущее			
Компания сосредоточена на реализации проектов по производству поликремния.			

Крупнейшие производители пластин за пределами Китая

NexWafe GmbH			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	Производственная мощность солнечных модулей в 2022 году, ГВт/год
Hans-Bunte-Straße 19, 79108 Freiburg im Breisgau, Germany	2015	Кремниевые пластины	0,25
Завод компании по производству пластин расположен в Биттерфельд-Вольфен, ФРГ. Завод на стадии строительства.			
Планы компании на будущее			
Увеличить производственные мощности по производству слитков и пластин до 500 МВт. В дальнейшем планирует создать производства по выпуску солнечных пластин в объеме до 6 ГВт в год.			

Photowatt		
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция
33 rue Saint-Honoré 38300 BOURGOIN-JALLIEU, France	1979	Кремниевые пластины, слитки, панели
Завод компании по производству пластин расположен в Бургуин-Жалльё, Франция.		

Крупнейшие производители поликремния в Китае

Tongwei Solar				
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция		
Китай, Чэнду	2009	- фотоэлектрические элементы из поликристаллического кремния; - высокопроизводительные фотоэлектрические модули; - поликристаллический кремний высокой чистоты для солнечной промышленности		
Мировой лидер в области производства поликремния высокой чистоты, имеет три подразделения (Баошань в Юньнани, Баотоу в районе Внутренняя Монголия и Лешань в провинции Сычуань).				
Общая производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год	Фактическое производство поликремния в 2022 году, тыс. т (прирост к 2021 году, %)	Объем продаж поликремния в 2022 году, тыс. т (прирост к 2021 году, %)	Выручка от продажи поликремния в 2022 году, млрд долл. США	Примечания
> 260	266,9 (+144,1%)	256,8 (+138,4%)	~ 8,5	Технология производства поликремния – модифицированный Сименс-процесс
Планы компании на будущее				
В декабре 2023 года компания объявила о планах инвестировать 28 млрд юаней (3,9 млрд долл. США) в увеличение своих производственных мощностей в фотоэлектрической отрасли. Tongwei построит новый завод по производству поликремния во Внутренней Монголии (1 этап – 200 тыс. т в 2025 году, далее 2 этап – 200 тыс. т).				

Xinte Energy (TBEA)				
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция		
Китай, Урумчи	2008	- поликристаллический кремний высокой чистоты для солнечной промышленности; - инверторы, фотоэлектрические пластины и модули		
Деятельность компании в основном связана с производством поликремния, а также строительством и эксплуатацией ветровых и солнечных электростанций. В 2022 году Xinte Energy ускорила рост мощностей по производству поликремния: завершены модернизация производственной линии на базе Синьцзян-Ганьцзянь, а также ввод в эксплуатацию завода по производству поликремния мощностью 100 тыс. тонн/год во Внутренней Монголии.				
Общая производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год	Фактическое производство поликремния в 2022 году, тыс. т (прирост к 2021 году, %)	Объем продаж поликремния в 2022 году, тыс. т (прирост к 2021 году, %)	Выручка от продажи поликремния в 2022 году, млрд долл. США	Примечания
200 (134 – в работе)	125,9	106,7 (+42,9%)	~ 3,6 (+121,7%)	Технология производства поликремния – модифицированный Сименс-процесс

GCL Technology				
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция		
Китай, Гонконг	2006	- гранулированный поликремний по технологии FBR (fluidised bed reactor); - фотоэлектрические кремниевые пластины; - фотоэлектрические модули; - иное энергетическое оборудование и услуги		
Одно из немногих предприятий в мире по низкоуглеродному производству кремниевых материалов. Также GCL Technology является ведущим разработчиком стандартов поликремниевой промышленности: в 2022 году компания разработала один национальный стандарт, также велась разработка еще четырех отраслевых стандартов, утверждение которых запланировано на 2023 год.				
Общая производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год	Фактическое производство поликремния в 2022 году, тыс. т (прирост к 2021 году, %)	Объем продаж поликремния в 2022 году, тыс. т (прирост к 2021 году, %)	Выручка от продажи поликремния в 2022 г., млрд долл. США	Примечания
185	104,7 (+120,0%)	93,9 (+96,4%)	~ 2,5 (+196,1%)	Технология производства поликремния – FBR
Планы компании на будущее				
В июне 2023 года компания GCL приняла решение прекратить производство поликремния на основе Сименс-процесса и перейти на производство гранулированного поликремния по технологии FBR (преимущества: низкая стоимость, низкое энергопотребление, низкий уровень выбросов). В 2023 году компания также объявила о строительстве завода по производству поликремния общей мощностью 120 тыс. т/год в Саудовской Аравии с плановым вводом в 2025 году.				

Daqo New Energy Corp.				
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция		
Китай, Ваньчжоу	2007	- поликристаллический и монокристаллический кремний высокой чистоты для солнечной промышленности		
Общая производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год	Фактическое производство поликремния в 2022 году, тыс. т (прирост к 2021 году, %)	Объем продаж поликремния в 2022 году, тыс. т (прирост к 2021 году, %)	Выручка от продажи поликремния в 2022 г., млрд долл. США	Примечания
205	133,8 (+ 54,1%)	132,9 (+ 76,4%)	4,6 (+ 174,5%)	Технология производства поликремния – модифицированный Сименс-процесс
Завод в Shihezi, Xinjiang				
Адрес завода	Год ввода в эксплуатацию	Площадь завода, км²	Количество сотрудников (2022 год)	Производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год

Китай, провинция Синьцзян, Шихэцзы	2012	-	-	105
Завод в Baotou, Inner Mongolia				
Адрес завода	Год ввода в эксплуатацию	Площадь завода, км²	Количество сотрудников (2022 год)	Производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год
Китай, Внутренняя Монголия, Баотоу	2022	-	-	100
Планы компании на будущее				
В 2023 году китайская компания Daqo New Energy увеличила производство и продажи поликремния примерно на 50% по сравнению с 2022 годом, в то время как резкое падение цен на поликремний привело к сокращению доходов до 2,3 млрд долл. США за тот же период. В декабре 2023 года компания подписала инвестиционное соглашение о строительстве нового завода в провинции Синьцзян в Китае с планом производства 100 тыс. т поликремния.				

#### Крупнейшие производители поликремния за пределами Китая

Wacker Chemie AG				
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция		
Германия, Мюнхен	1914	- сверхчистый кремний для полупроводниковой и фотоэлектрической промышленности; - кремниевые соединения; - силиконовые каучуки; - полимерные продукты (в частности, этилен винилацетата); - полимерные порошки		
Немецкая химическая компания, продукция которой включает сверхчистый кремний для полупроводниковой промышленности, кремниевые соединения.				
Общая производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год	Фактическое производство поликремния в 2022 году, тыс. т (прирост к 2021 году, %)	Объем продаж поликремния в 2022 году, тыс. т	Выручка от продажи поликремния в 2022 г., млрд долл.	
80	-	~ 82	2,5 (+49,5%)	
Завод Wacker Chemie AG Бургхаузен, Германия				
Бургхаузен является крупнейшей производственной площадкой компании. Все производственные подразделения компании WACKER производят продукцию в Бургхаузене; а также Siltronic AG и Vinnolit GmbH & Co. KG. Включает в себя 150 производственных предприятий. 2010 г. – новая площадка производства металлургического кремния в Норвегии (с последующей очисткой на предприятиях WACKER POLYSILICON в Бургхаузене, Нюнхриц, а с 2016 года также в Чарльстоне, США).				
Адрес завода	Год ввода в эксплуатацию	Площадь завода, км²	Количество сотрудников (2022 год)	Производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год
Германия, Бавария, Бургхаузен	1959 (2000 – запуск производства «солнечного» поликремния)	2,6	8000	40
Завод Wacker Chemie AG Нюнхриц, Германия				

Производство силанов, силиконов, диоксидов кремния и поликристаллического кремния для солнечных модулей (Чистота поликремния: 99,9999999%).  
Завод в Нюнхрице сертифицирован в соответствии со стандартами ISO 9001, ISO 14001, ISO 50001 и ISO 22716, а также является членом Саксонского экологического альянса.

Адрес завода	Год ввода в эксплуатацию	Площадь завода, км <sup>2</sup>	Количество сотрудников (2022 год)	Производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год
Германия, Саксония, Нюнхриц	1990	1,3	1500	20

Завод Wacker Polysilicon Чарльстон North America, LLC

Производство поликристаллического кремния высокой чистоты.

Адрес завода	Год ввода в эксплуатацию	Площадь завода, км <sup>2</sup>	Количество сотрудников (2022 год)	Производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год
США, штат Теннесси, Чарльстон	2016	2,2	650	20

Планы компании на будущее

В 2023 году компания объявила о расширении производства поликремния полупроводникового качества на заводе в Бургхаузене, что позволит увеличить производственную мощность завода более чем на 50% к 2025 году.

OCI			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	Общая производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год
Южная Корея, Сеул	1959	- поликристаллический кремний для полупроводниковой (11N) и солнечной промышленности (10N) ультравысокой чистоты; - фосфорная кислота, перекись водорода полупроводникового качества и другие материалы для химической промышленности.	40

Химическая компания, занимающаяся производством поликремния с 2008 года.

Завод по производству поликремния в Сараваке, Малайзия – OCI Holdings Sarawak Plant (OCIMSB)

В 2022 году дочерняя компания OCIMSB увеличила производственную мощность завода по выпуску поликремния для солнечной энергетики в Сараваке с 30 до 35 тыс. тонн.  
В 2022 году OCIMSB подписала контракт с Hanwha Solutions, одним из ведущих корейских поставщиков комплексных решений для солнечной энергетики, на поставку поликремния солнечного качества с 2024 по 2034 год на 1,2 млрд долл. США.  
В 2023 году OCIMSB также заключила сделку с американским производителем солнечных пластин CubicPV на поставку производимого на заводе в Малайзии поликремния в течение 8 лет, начиная с 2025 года, на 1 млрд долл. США.

Адрес завода	Год ввода в эксплуатацию	Площадь завода, км <sup>2</sup>	Количество сотрудников (2022 год)	Производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год
Малайзия, штат Саравак, город Кучинг	2017	-	-	35

Завод по производству поликремния в Кунсане, Южная Корея - OCI Gunsan Plant

Завод в Кунсане в Кореи производит поликремний для электронной промышленности с паспортной мощностью 4,7 тыс. тонн/год.

Адрес завода	Год ввода в эксплуатацию	Площадь завода, км <sup>2</sup>	Количество сотрудников (2022 год)	Производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год
Южная Корея, Кунсан	2008	-	-	4,7

Планы компании на будущее

Компания планирует увеличить годовую производственную мощность завода в Малайзии на дополнительные 30 тыс. тонн «солнечного» поликремния до 2027 года.

REC Silicon			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	
Норвегия, Люсакер	1983	- поликристаллический кремний высокой чистоты для электронной и солнечной промышленности; - силан и другие специальные газы для полупроводниковой и солнечной промышленности	

Ведущий мировой производитель кремниевых материалов на основе силана, поставляющий поликремний высокой чистоты для солнечной и электронной промышленности.

Общая производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год	Фактическое производство поликремния в 2022 году, тыс. т (прирост к 2021 году, %)	Объем продаж поликремния в 2022 году, тыс. т (прирост к 2021 году, %)	Выручка от продажи поликремния в 2022 г., млрд долл. США	Примечания
18	1,375 (+12,3%) *весь объем для полупроводниковой промышленности	1,43 (-12,7%) *весь объем для полупроводниковой промышленности	0,061 млрд (+11,2%)	Технология производства поликремния – традиционный Сименс-процесс (завод в Бьютте) и FBR (в Мозес-Лейк)

Завод REC Advanced Silicon Materials LLC в Бьютте, США

В 2021 и 2022 году всё производство поликремния приходилось на сегмент полупроводниковых материалов.

Адрес завода	Год ввода в эксплуатацию
США, штат Монтана, округ Силвер Боу, город Бьютт	1998

В начале 2024 года компания объявила о закрытии завода в Бьютте ввиду энергоемкого процесса получения поликремния, расположенного в регионе с высокими затратами на электроэнергию.

Завод REC Solar Grade Silicon LLC в Мозес-Лейк, США

В 2019 году завод по производству поликремния по технологии FBR был закрыт из-за сложных рыночных условий, высоких китайских тарифов на производимый в США поликремний (не позволяющих REC продавать свою продукцию китайским производителям солнечных панелей) и снижения спроса на производимый компанией поликремний солнечного качества.  
В 2023 году запланировано возобновление производства поликремния на заводе. Производство по технологии FBR позволяет потреблять на 80–90% меньше энергии, чем традиционный метод Siemens, и поставлять низкоуглеродный поликремний для солнечной промышленности.

Адрес завода	Год ввода в эксплуатацию
США, штат Вашингтон, город Мозес-Лейк	1984 (2002 - старт производства поликремния для солнечной энергетики)

Планы компании на будущее

Перезапуск завода в Мозес-Лейк является результатом сделки с южнокорейским производителем солнечных панелей Hanwha Solutions. Поликремний, производимый REC Silicon, будет использоваться для производства слитков и пластин на новом заводе Qcells (входит в Hanwha) в Далтоне, штат Джорджия, а также получит налоговую льготу в размере 3 долл. США/кг в соответствии с Законом о сокращении инфляции США (IRA).

Hemlock Semiconductor			
Адрес штаб-квартиры	Год основания	Основная продукция	Общая производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год
США, штат Мичиган, Хемлок	1961	- поликристаллический кремний высокой чистоты для электронной и солнечной промышленности; - другие продукты на основе кремния, используемые в производстве полупроводниковых устройств, солнечных элементов и модулей	18

Крупнейший производитель поликремния высокой чистоты, необходимого для производства моно- и мультикристаллических слитков и пластин, в США.

Hemlock Semiconductor		
Адрес завода	Год ввода в эксплуатацию	Производственная мощность в 2022 году, тыс. т/год
США, штат Мичиган, Хемлок	1961	18

Планы компании на будущее

В октябре 2022 года компания приступила к реализации проекта Next Generation Finishing в округе Сагино (штат Мичиган, США) стоимостью 375 млн долл. США. Проект расширения призван модернизировать процессы производства поликремния HSC и запланирован к реализации до конца 2025 года.



**А Р В Э**  
АССОЦИАЦИЯ РАЗВИТИЯ  
ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

## Об Ассоциации

Ассоциация развития возобновляемой энергетики (АРВЭ) — ведущая экспертная площадка в России в сфере возобновляемой энергетики, представляющая интересы крупнейших и наиболее активных участников российского сектора ВИЭ и низкоуглеродного водорода — растущего высокотехнологичного рынка с объемом уже вложенных инвестиций в размере более 600 млрд рублей.

Ассоциация объединяет генерирующие компании, инвесторов и девелоперов проектов ВИЭ-генерации, производителей и поставщиков оборудования, технологические компании, научно-исследовательские и финансовые институты в целях формирования благоприятного инвестиционного климата, прозрачного правового регулирования и популяризации технологий энергоперехода для достижения целей низкоуглеродного развития России.

## Направления деятельности:



### Образование и наука

Содействие формированию системы профессиональной подготовки кадров, в том числе оказание поддержки образовательным учреждениям по разработке специализированных программ повышения квалификации, содействие в разработке государственных отраслевых программ стимулирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок в сфере возобновляемой и водородной энергетики.



### Связи с общественностью

Популяризация темы энергоперехода в публичном пространстве. Продвижение консолидированной позиции участников рынка в информационном поле и формирование позитивного имиджа отрасли. Организация и проведение отраслевых мероприятий, осуществление информационного сопровождения деятельности членов Ассоциации и представление их интересов в СМИ.



### Аналитика и экспертиза

Комплексная аналитика тенденций развития возобновляемой и водородной энергетики в России и за рубежом. Разработка и регулярный выпуск аналитических материалов и отраслевой статистики (обзоры рынка, инвестиционные рейтинги, прогнозы, реестры и пр.).



### Взаимодействие с органами государственной власти

Выработка нормотворческих инициатив в целях обеспечения ускоренного и гармоничного развития отраслей возобновляемой и водородной энергетики, участие в разработке и подготовке проектов законодательных и нормативных актов, экспертная поддержка органов государственной власти при принятии стратегических решений. Участие в ключевых отраслевых рабочих группах при федеральных и региональных органах исполнительной и законодательной власти, инфраструктурных и международных организациях в целях формирования устойчивой регуляторной базы и институциональной среды.



### Международное сотрудничество

Организация взаимодействия и обмен опытом с иностранными отраслевыми сообществами, ассоциациями и международными организациями, поддержка продвижения российских технологий и компетенций на внешних рынках, поддержка и сопровождение международных проектов компаний-членов Ассоциации.



**А Р В Э**

АССОЦИАЦИЯ РАЗВИТИЯ  
ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

**Узнать подробнее  
о деятельности Ассоциации:**



Наш сайт



Telegram-канал