



**МГУ имени
М.В.Ломоносова**



**Лаборатория новых материалов для
солнечной энергетики ФНМ МГУ**

Революция в зелёной энергетике: перовскитные солнечные батареи

Алексей Борисович Тарасов

к.х.н., заведующий лабораторией
Новых материалов для солнечной энергетики
Факультет наук о материалах МГУ

22/06/2020



История развития источников энергии

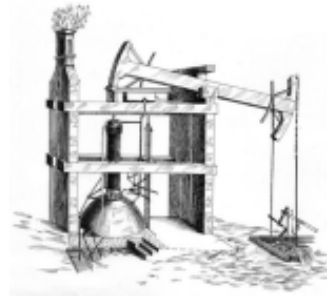
- Мускульная сила
- Сжигание дерева



- Ветряные мельницы (XII в)



- Паровая энергетика (XVIII в)



- Сжигание нефти (1859)



- Атомная электростанция (1954)



Древний мир

Средние века

Новое время

Новейшее время

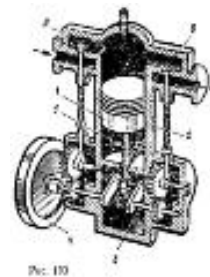
- Энергия ветра (парус)
- Водяное колесо (2 век до н.э);



- Сжигание угля (1763)



- Двигатель внутреннего сгорания (1807)



- Геотермальная (1904)
- Ветряная (1931)

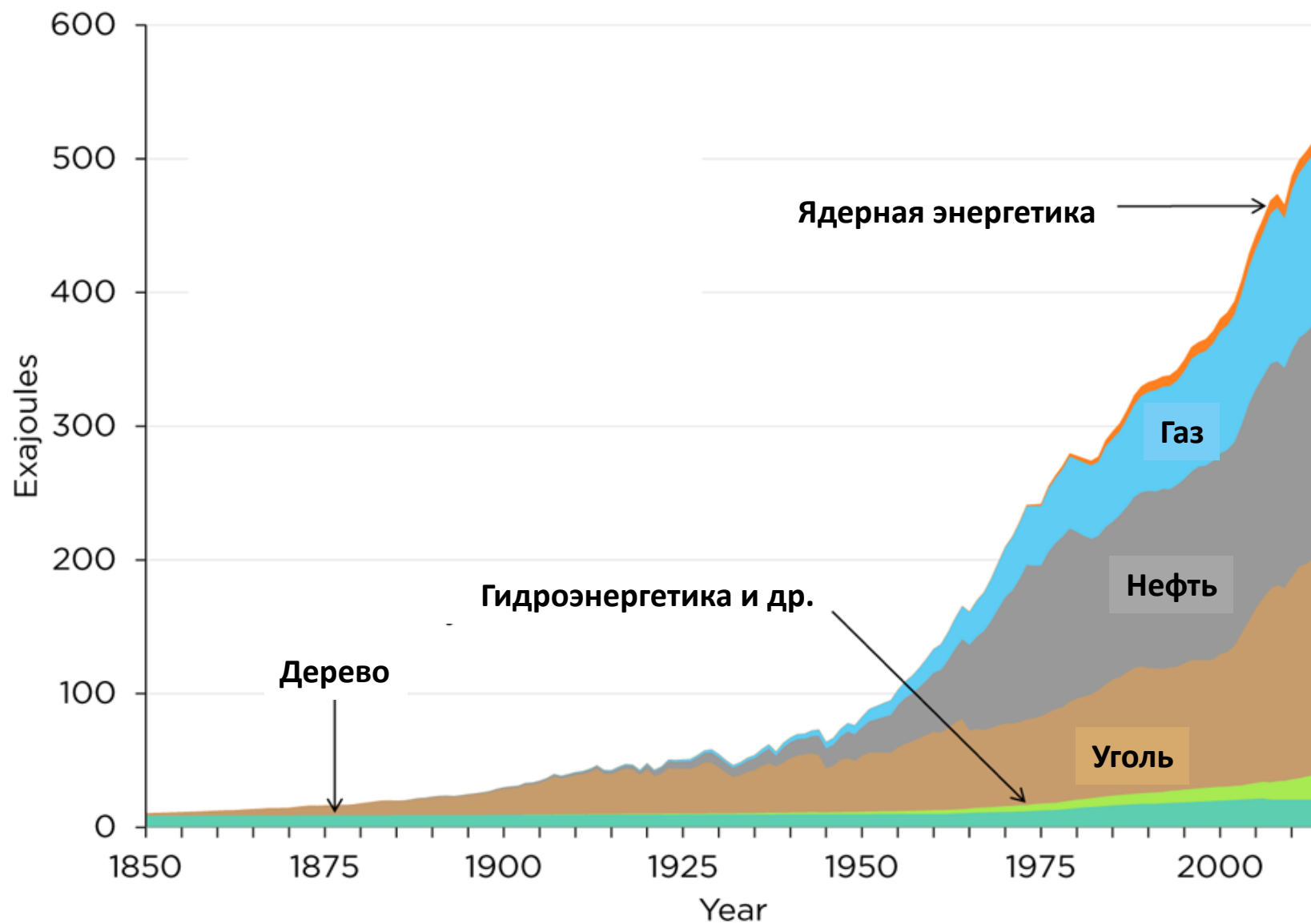


- Солнечные батареи (1958)



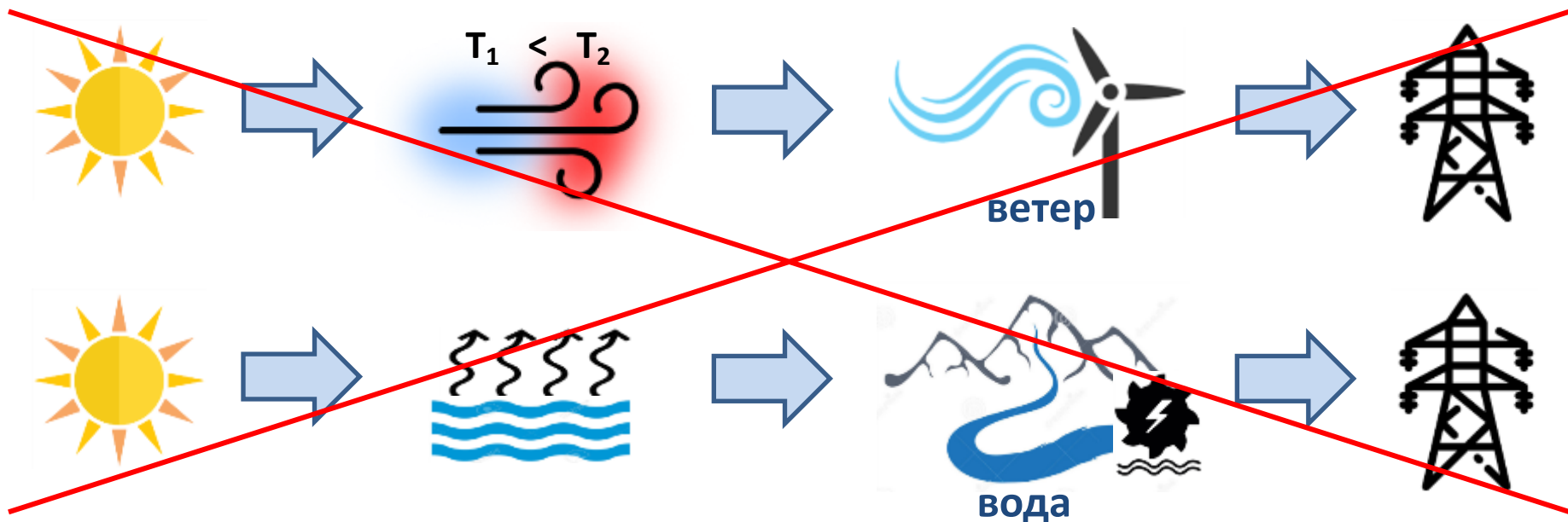


За последние 50 лет потребление человечеством электроэнергии возросло в 5 раз!



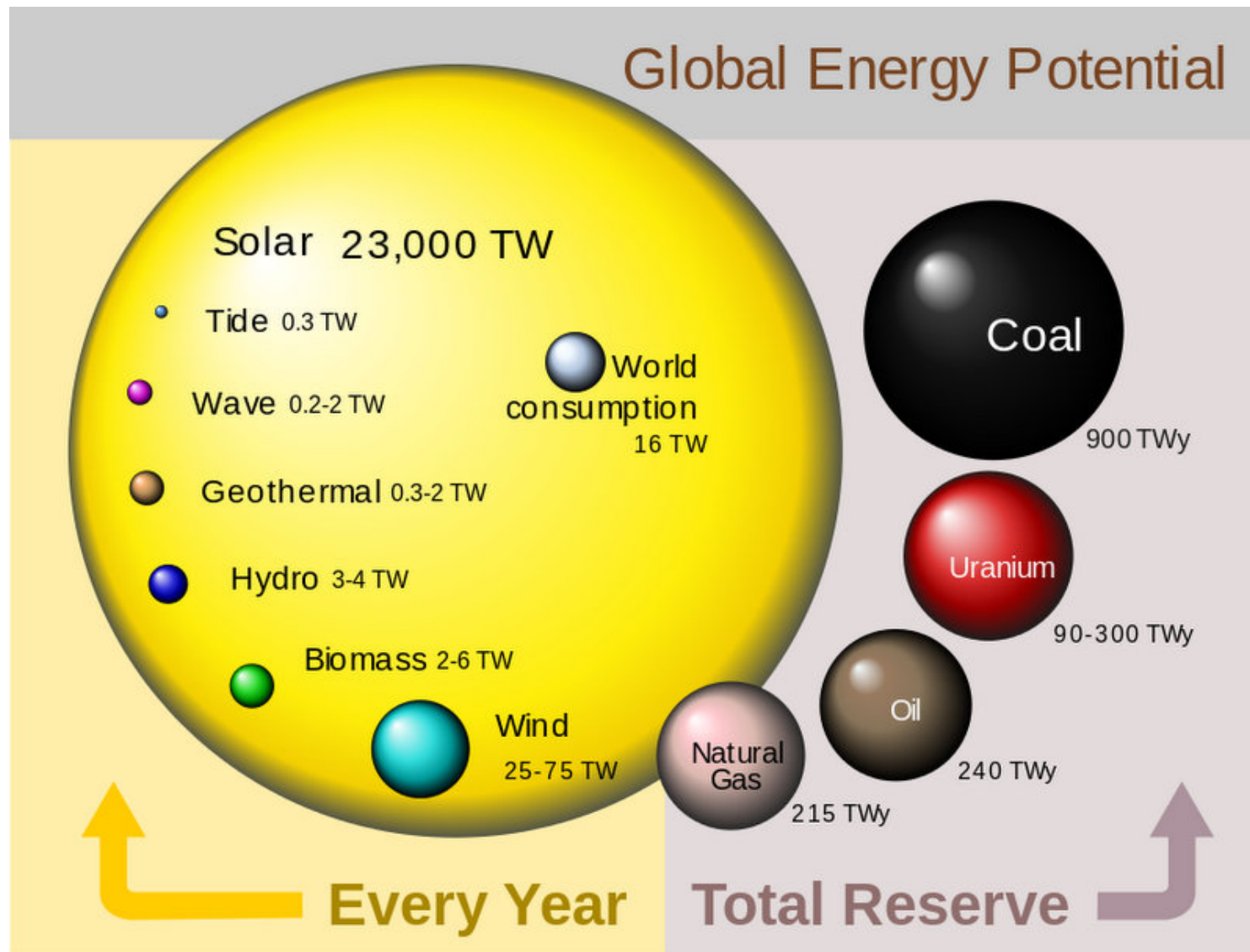


Солнечные элементы – прямой способ преобразовать энергию солнца в электричество





Запасы солнечной энергии неисчерпаемы и в 1000 раз больше мирового потребления

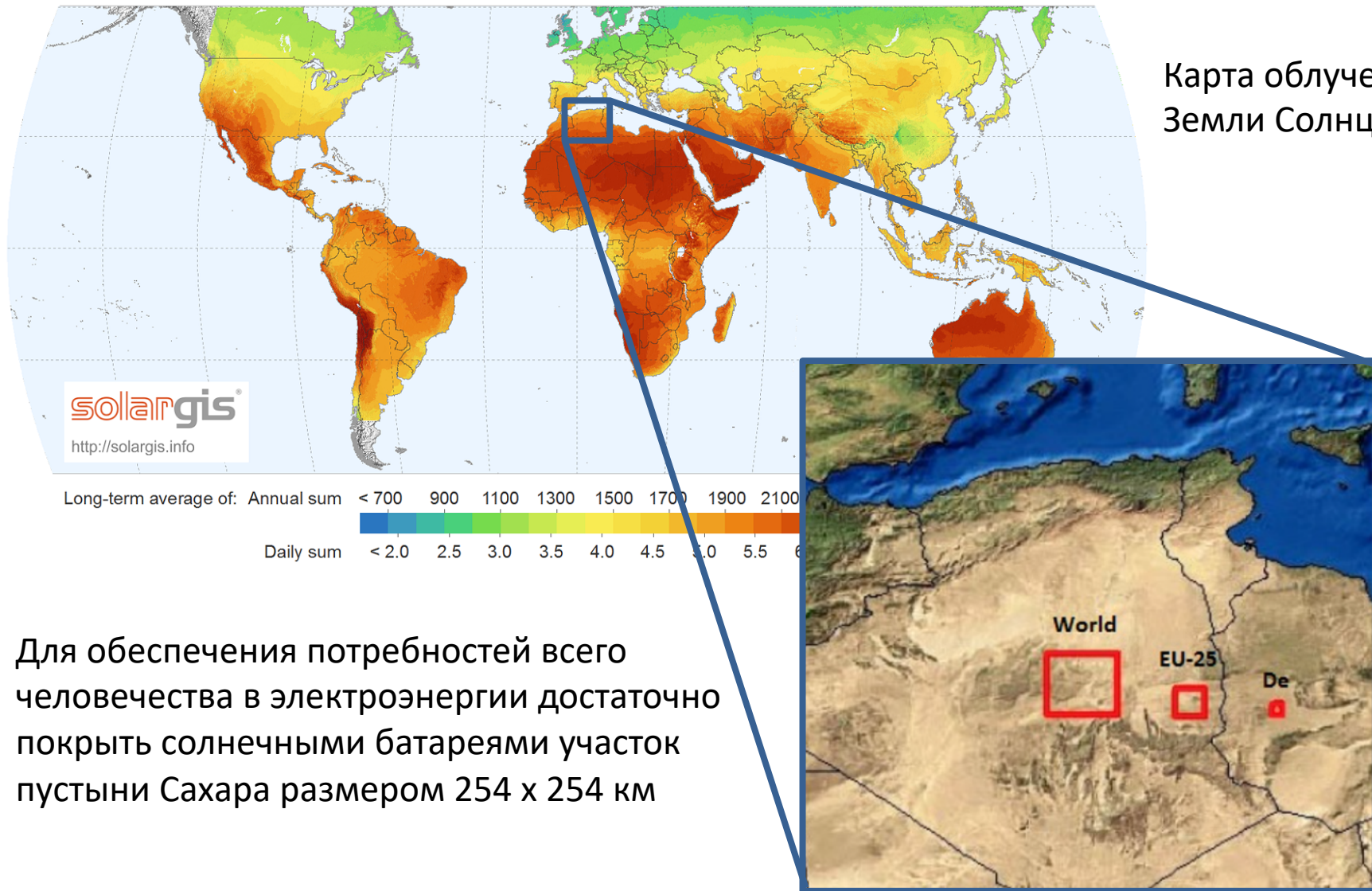




Энергия Солнца – нескончаемый и самый безопасный источник энергии



Карта облучения
Земли Солнцем

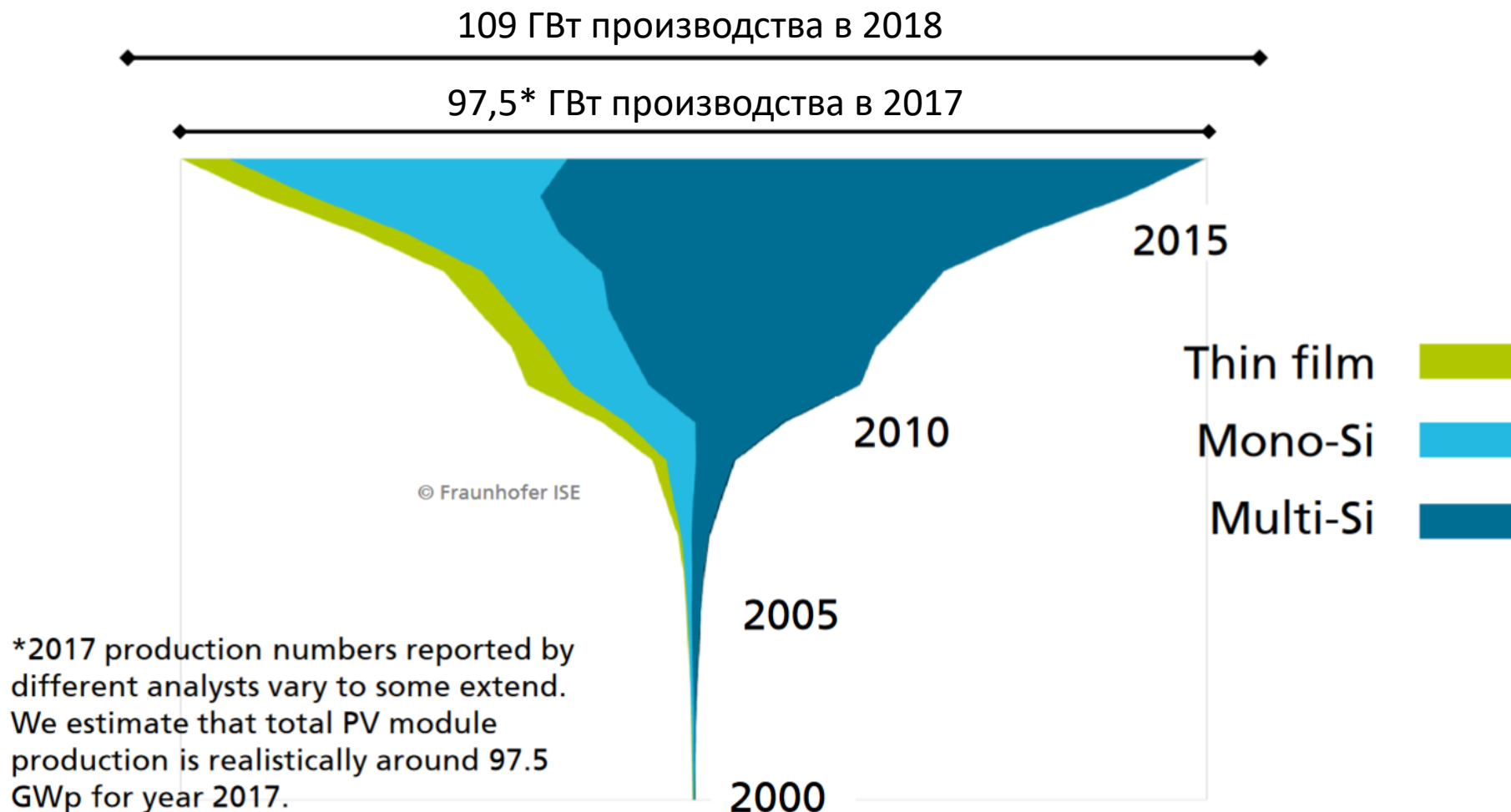


Для обеспечения потребностей всего человечества в электроэнергии достаточно покрыть солнечными батареями участок пустыни Сахара размером 254 x 254 км






Состояние рынка солнечных батарей



Fraunhofer
ISE

Материалы доклада Fraunhofer ISE, август 2018



«Зеленые» электростанции обошли атомные по производству электричества

 РБК 17.06.20

В России:

- В 2013 г правительство утвердило стимулы для строительства «зеленых» электростанций
- К 2020 году построено **1,4 ГВт солнечных электростанций**



- **Фотон** – минимальная «порция» света
- Разные фотоны обладают разной энергией
- Энергия фотона связана с частотой излучения и длиной волны

$$E = h\nu$$

E [Дж] – энергия

h [Дж·м] – постоянная Планка

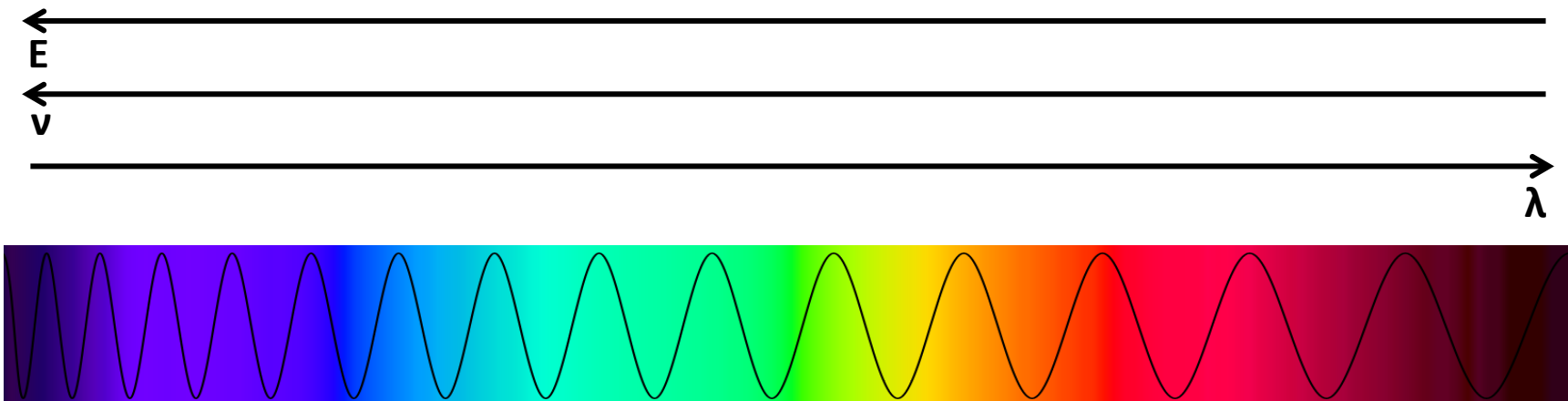
ν [м] – частота

$$\lambda = c/\nu$$

c [м/сек] – скорость света

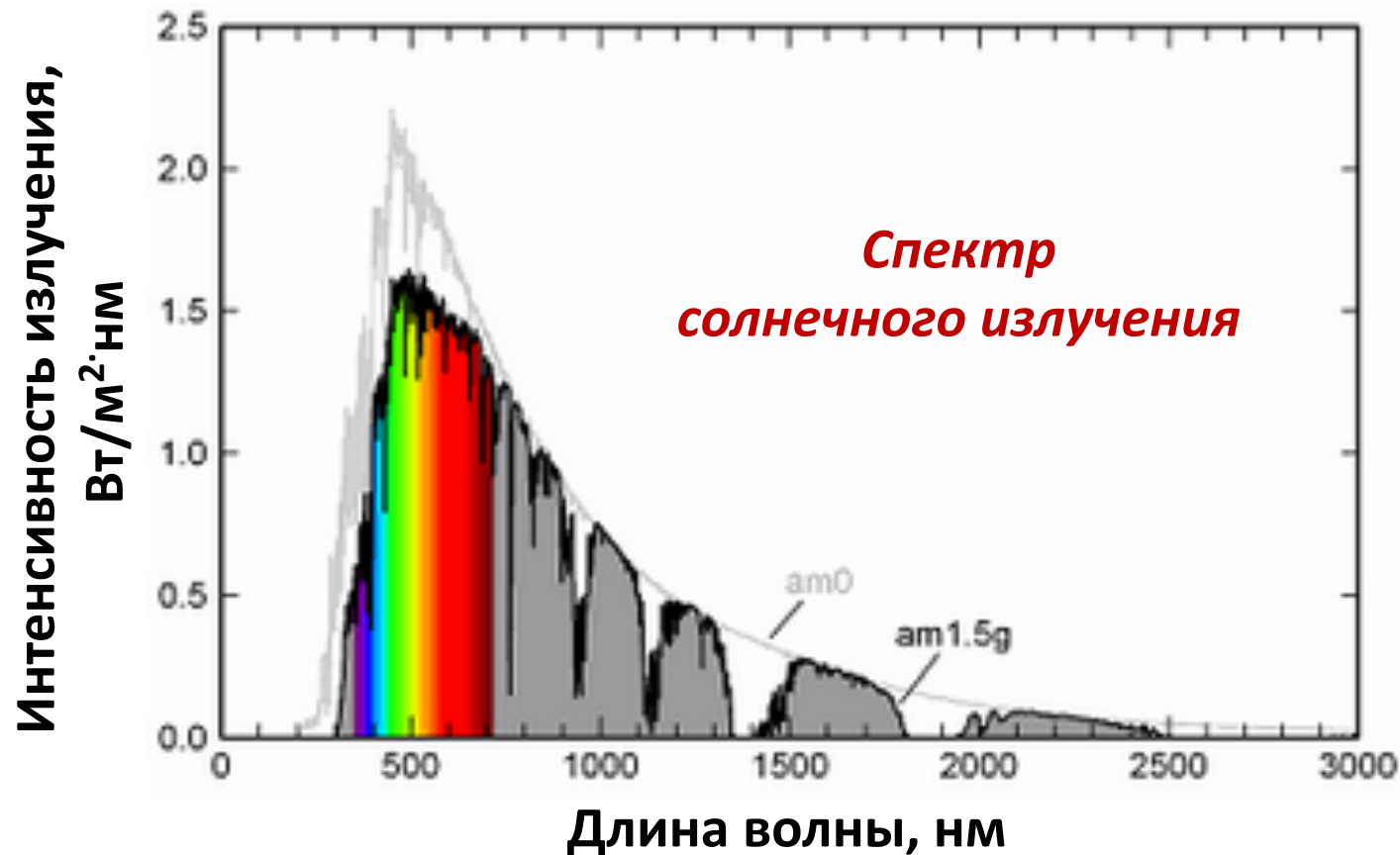
λ [м] – длина волны

ν [1/сек] – частота





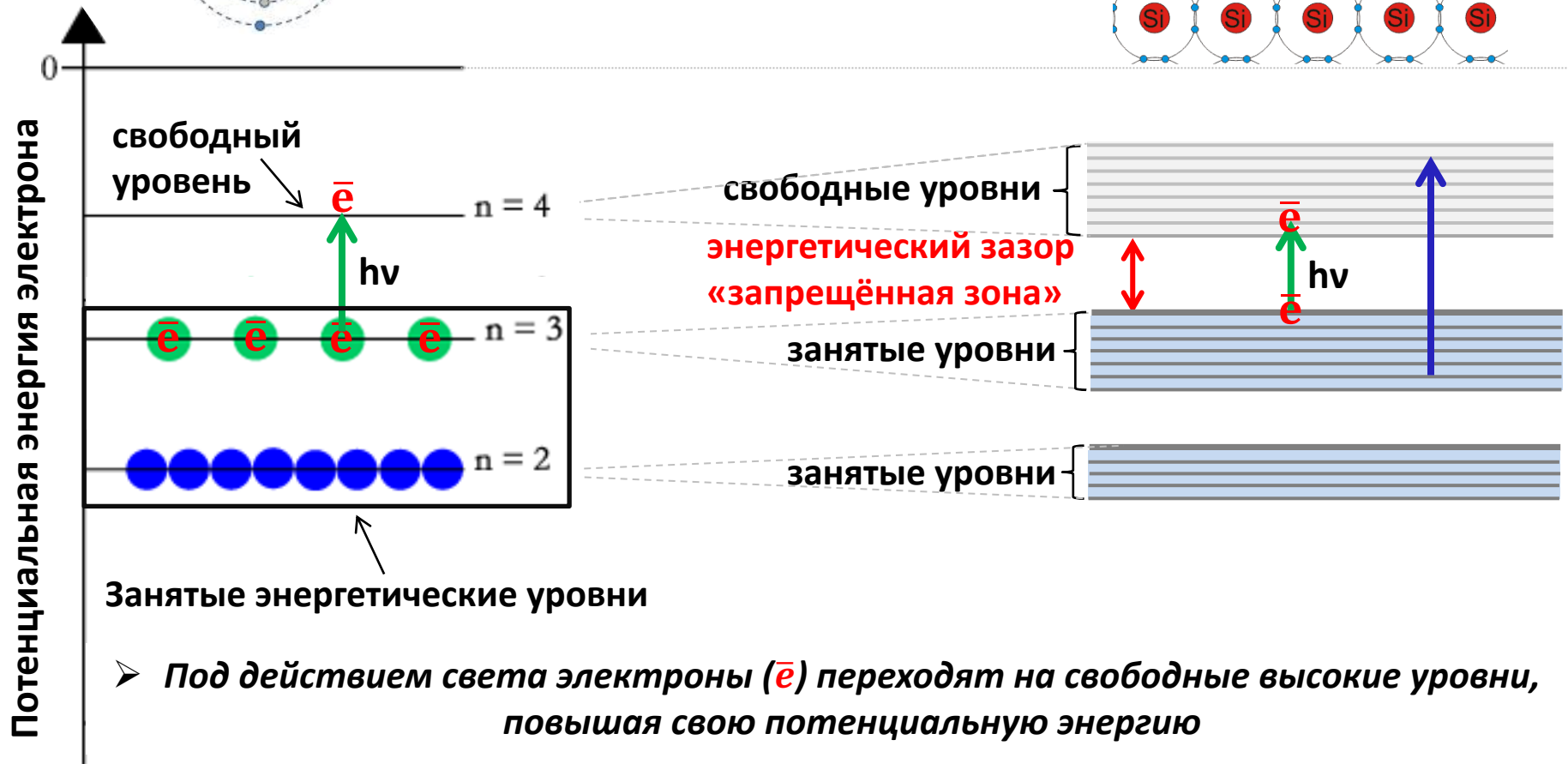
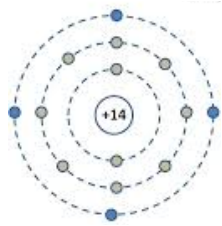
- **Фотон** – минимальная «порция» света
- Разные фотоны обладают разной энергией
- Энергия фотона связана с частотой излучения и длиной волны





Как свет взаимодействует с веществом?

Изолированный атом

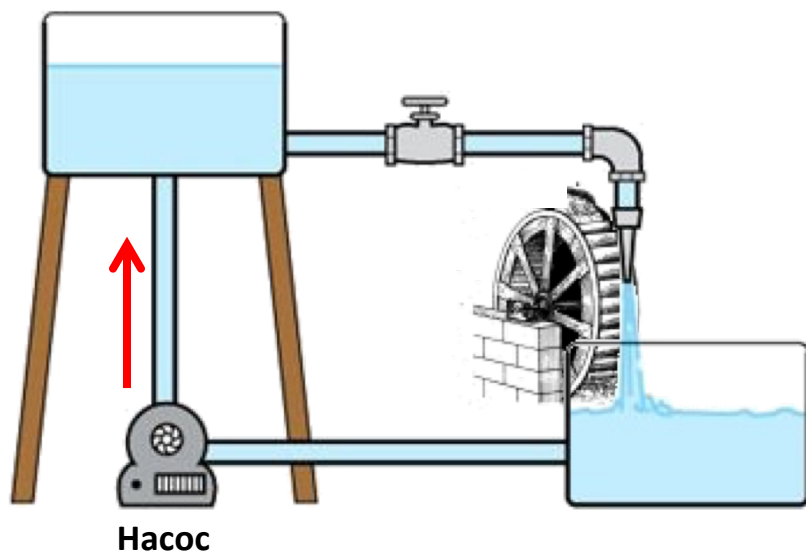




Солнечный элемент работает подобно водяному насосу: энергия солнечного света передаётся электронам

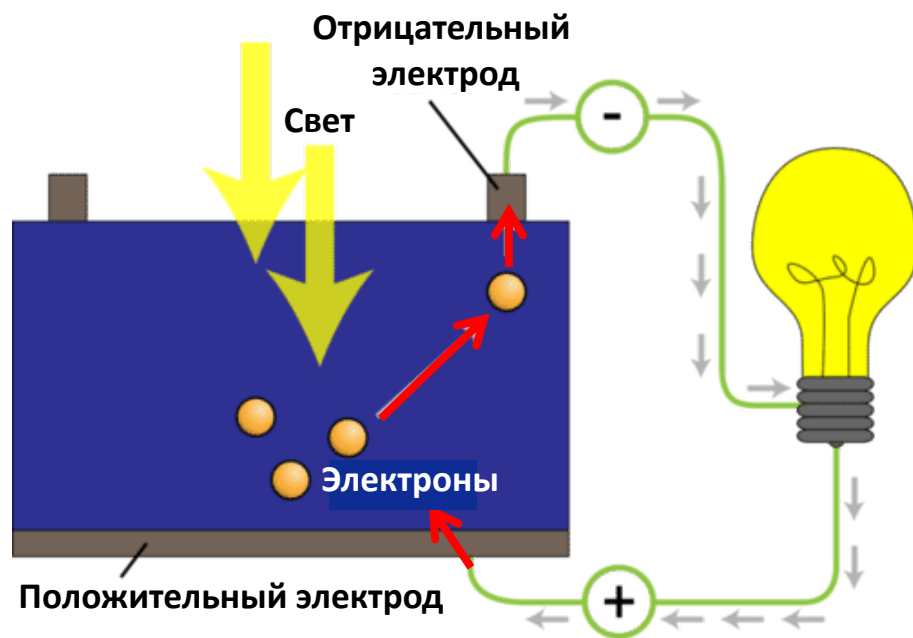


Водяной насос



Потенциальная энергия воды
переходит в кинетическую
и создаёт ток воды

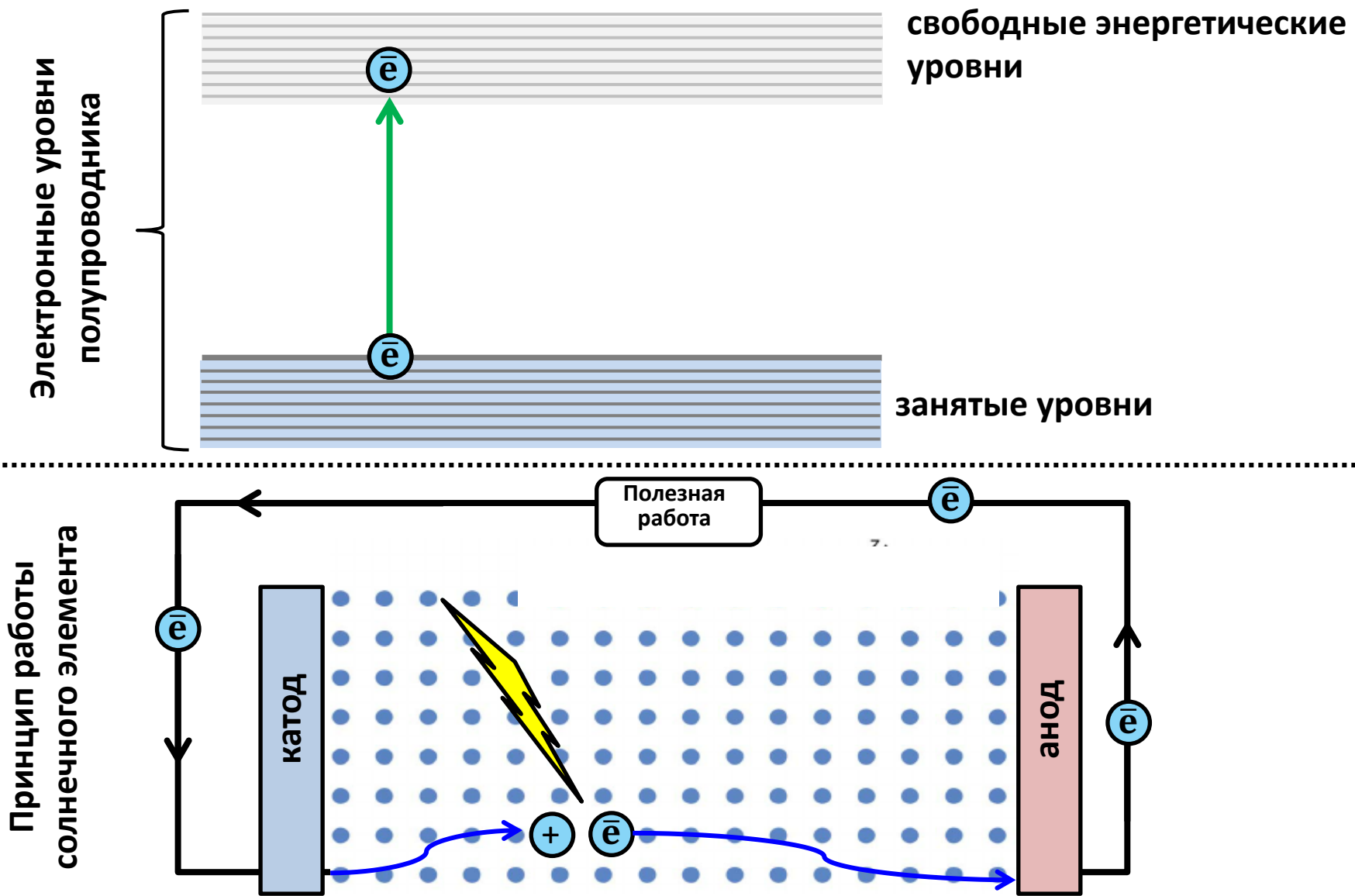
Солнечный элемент



Энергия фотонов
передаётся электронам
и создаёт электрический ток



Как в материале возникает электрический ток под действием света?





Существуют различные типы солнечных элементов



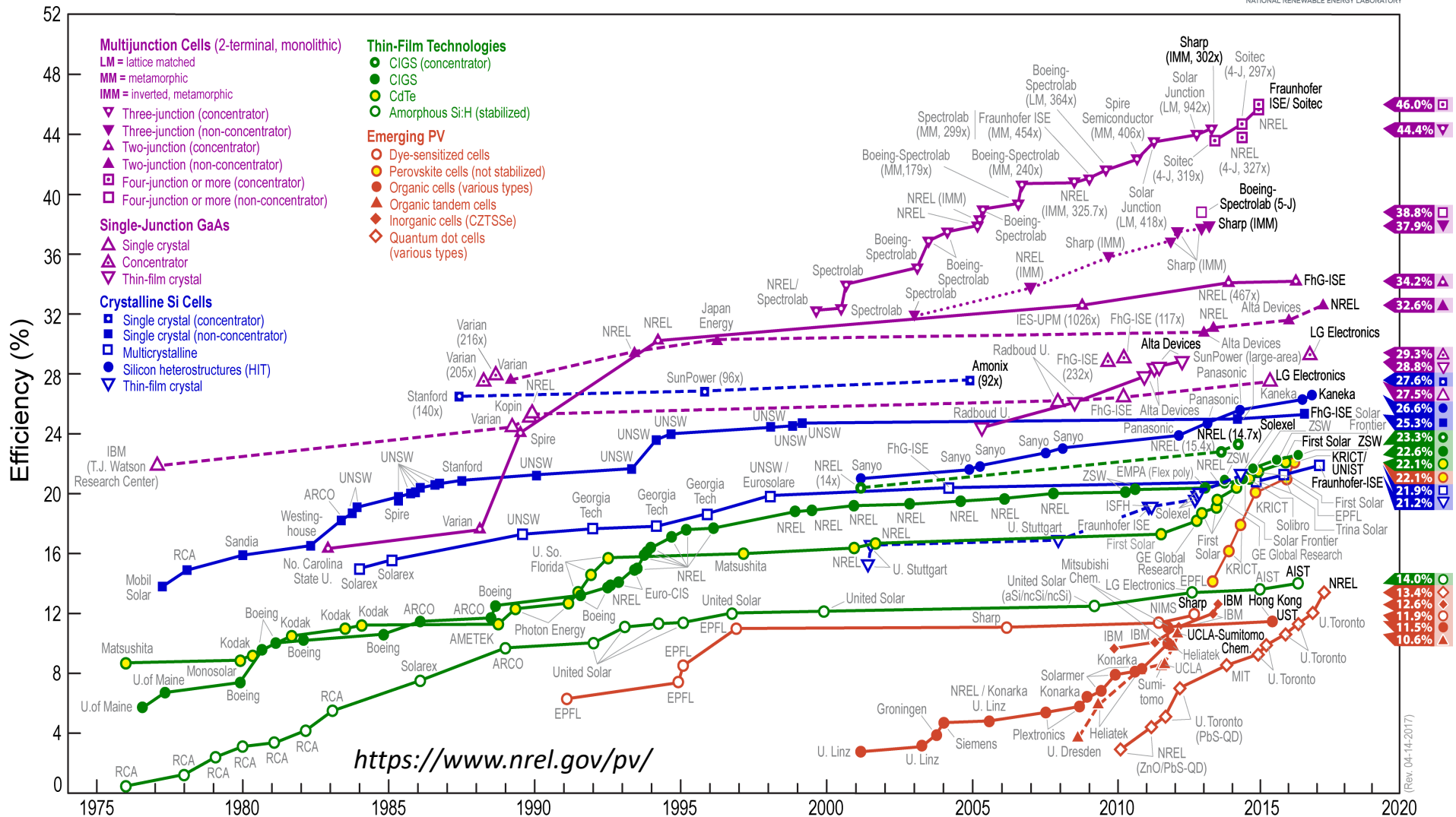
Si	Кремниевые	• Самые распространённые	$\eta \approx 14\%$
Ga, As	Гетероструктурные	• Самые эффективные	$\eta > 25\%$
C	Органические	• Самые гибкие	$\eta \approx 10\%$
Ru	Сенсибилизированные красителем (DSSC)	• Самые дешёвые	$\eta \approx 9\%$
Pb, I	Перовскитные	• Самые перспективные и быстроразвивающиеся	$\eta > 20\%$



Рост КПД солнечных элементов различных типов



Best Research-Cell Efficiencies

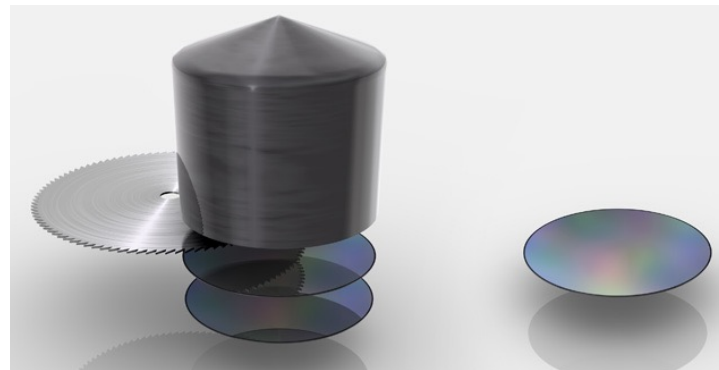
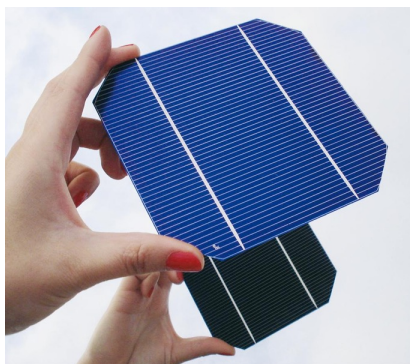
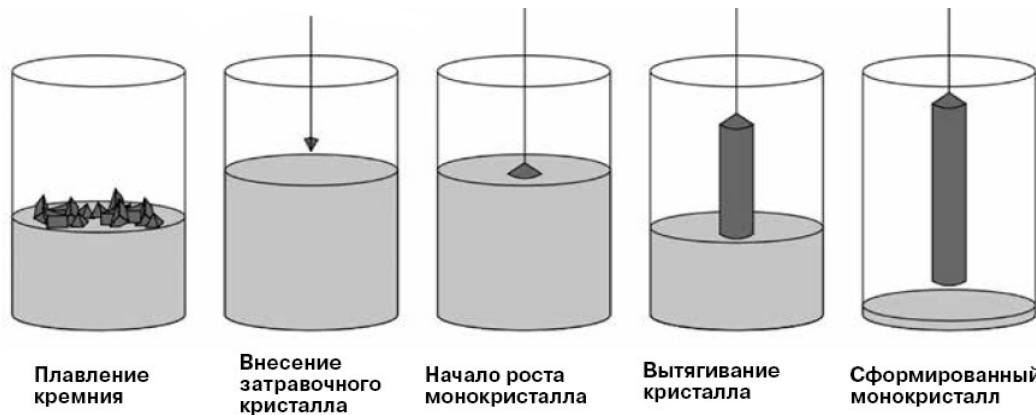




Кремниевые солнечные батареи – самый распространённый тип

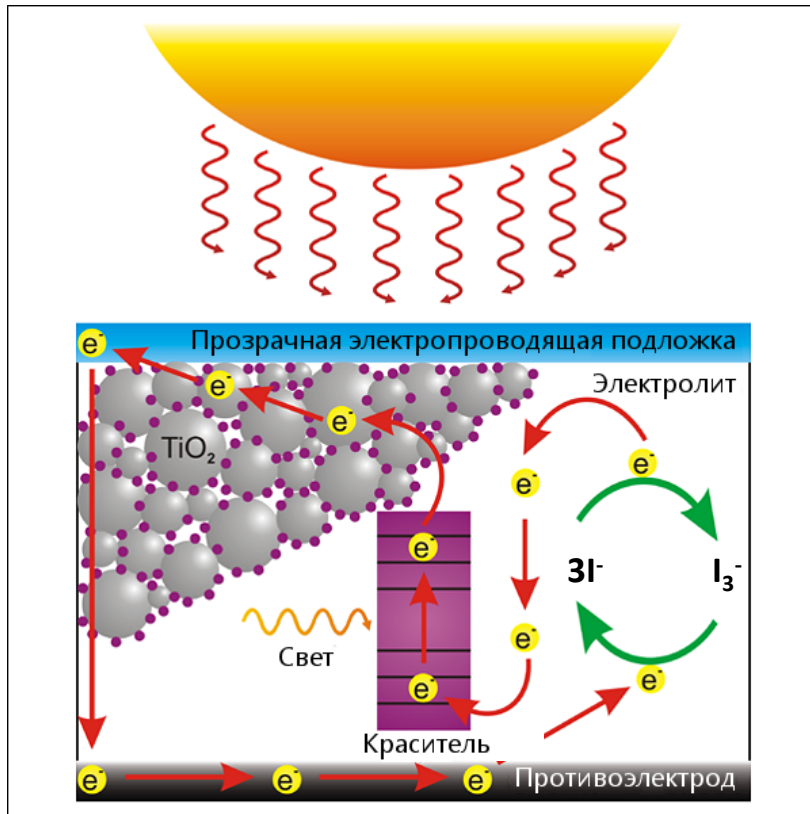
Технология получения:

1. Выплавка кремния из песка (**2000°C**)
2. Осаждение кремния из парогазовой смеси водорода и силана (**650 – 1300°C**)
3. Осаждение бора и фосфора из газовой фазы
4. Напыление обратного электрода

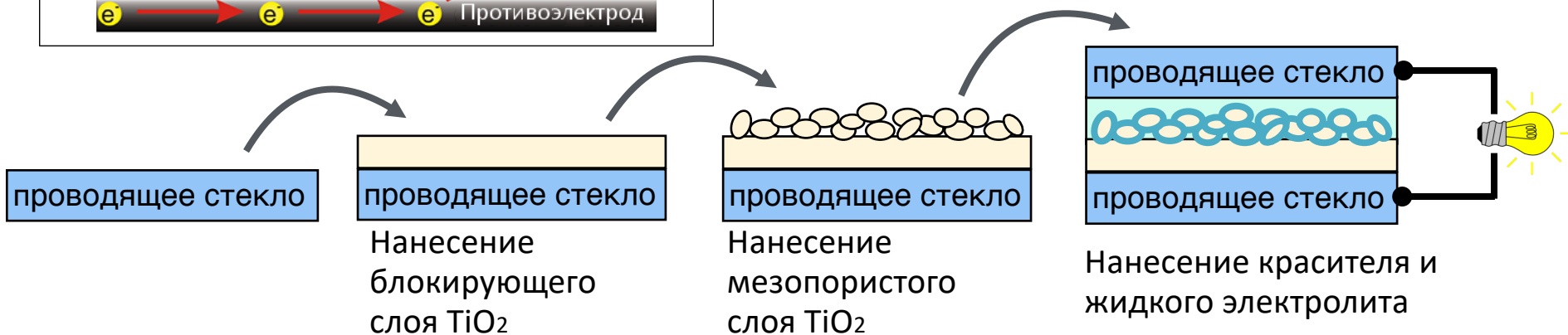




В 1991 г М. Гретцель и О'Рейган открыли новый тип дешёвых солнечных ячеек



Михаэль Гретцель





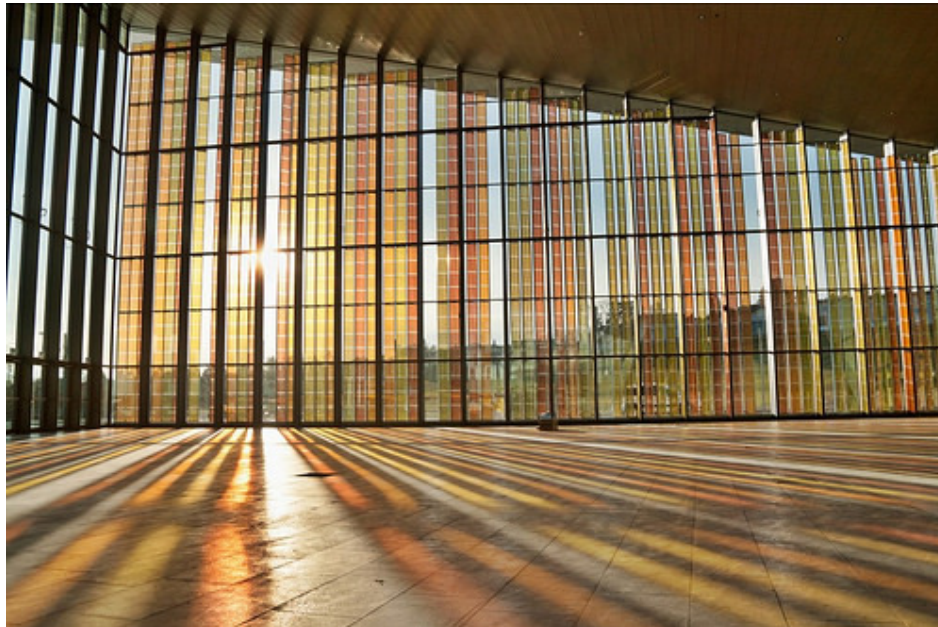
Примеры применения промышленно выпускаемых гетцелевских солнечных батарей



«Вечная»
электронная книга

Станция подзарядки
электромобиля

BIPV-фасады и ограждения





Наша лаборатория активно сотрудничает с проф. Гретцелем – лидером в области перовскитной фотовольтаики



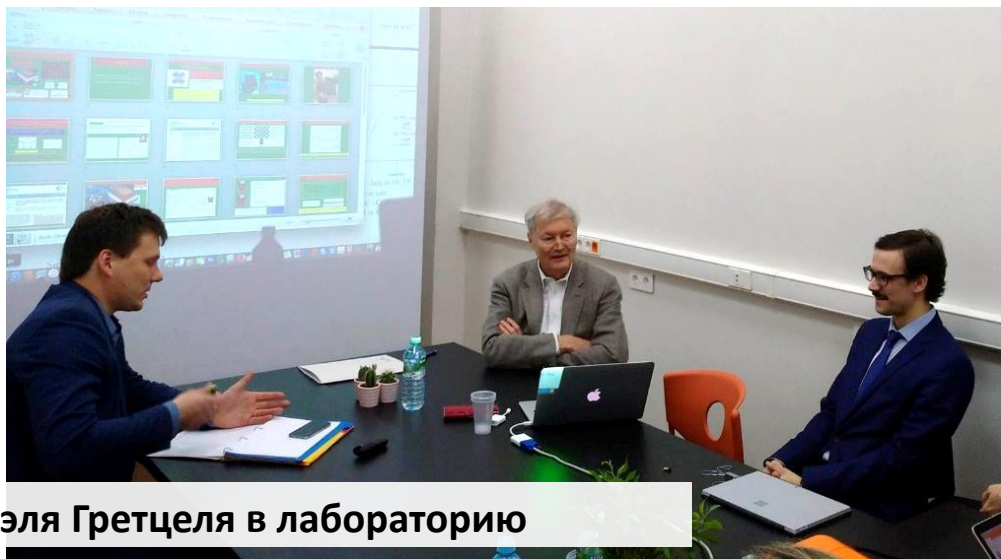
Вручение премии
«RUSNANOPRIZE»



Вручение премии
«Global Energy Prize»



Визит проф. Михаэля Гретцеля в лабораторию

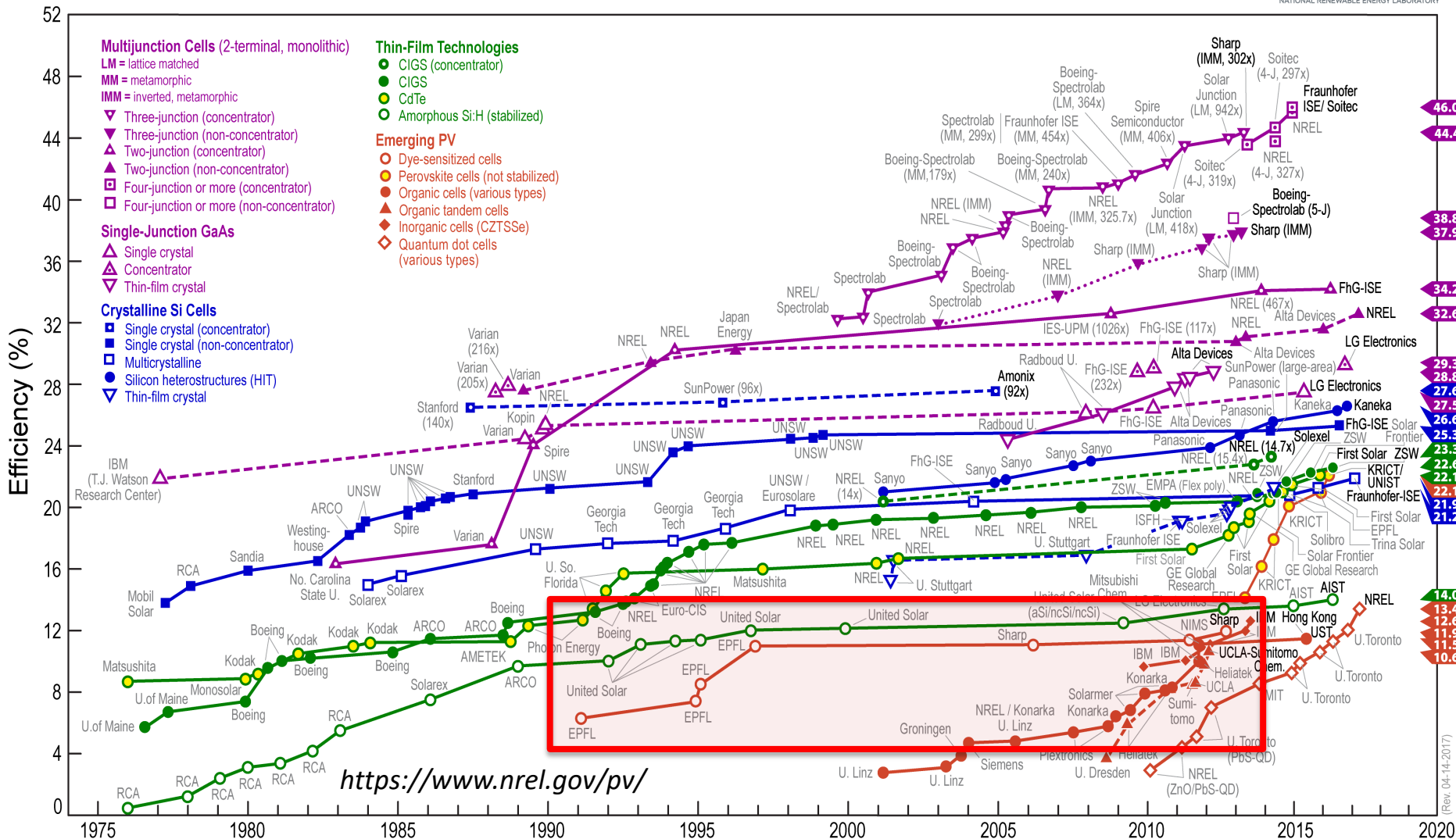




Рост эффективности «гретцелевских» солнечных ячеек быстро достиг устойчивого плато



Best Research-Cell Efficiencies

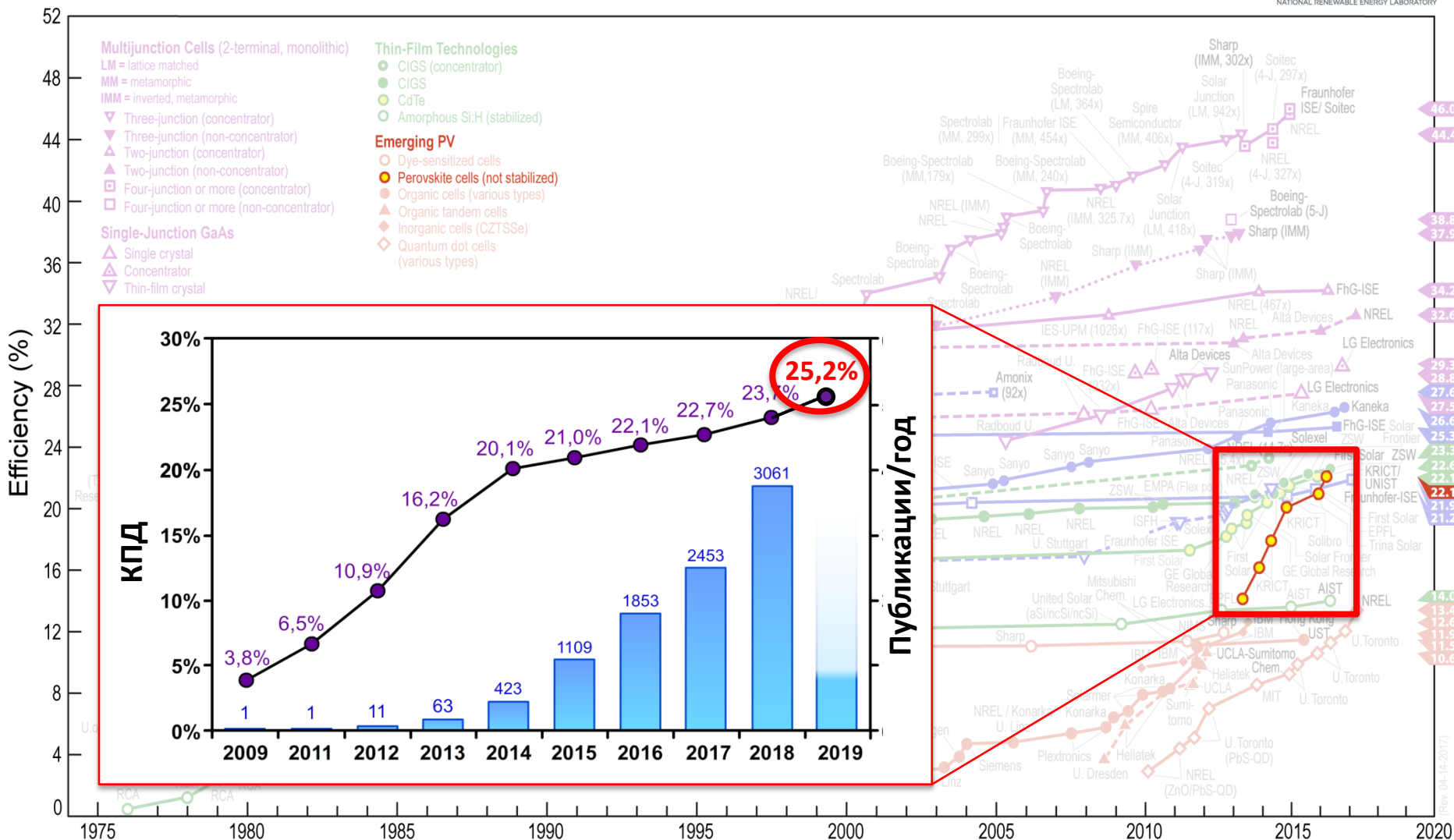




Перовскитные солнечные элементы – самая быстроразвивающаяся область фотовольтаики

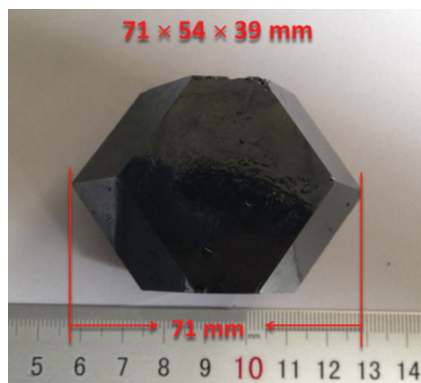


Best Research-Cell Efficiencies

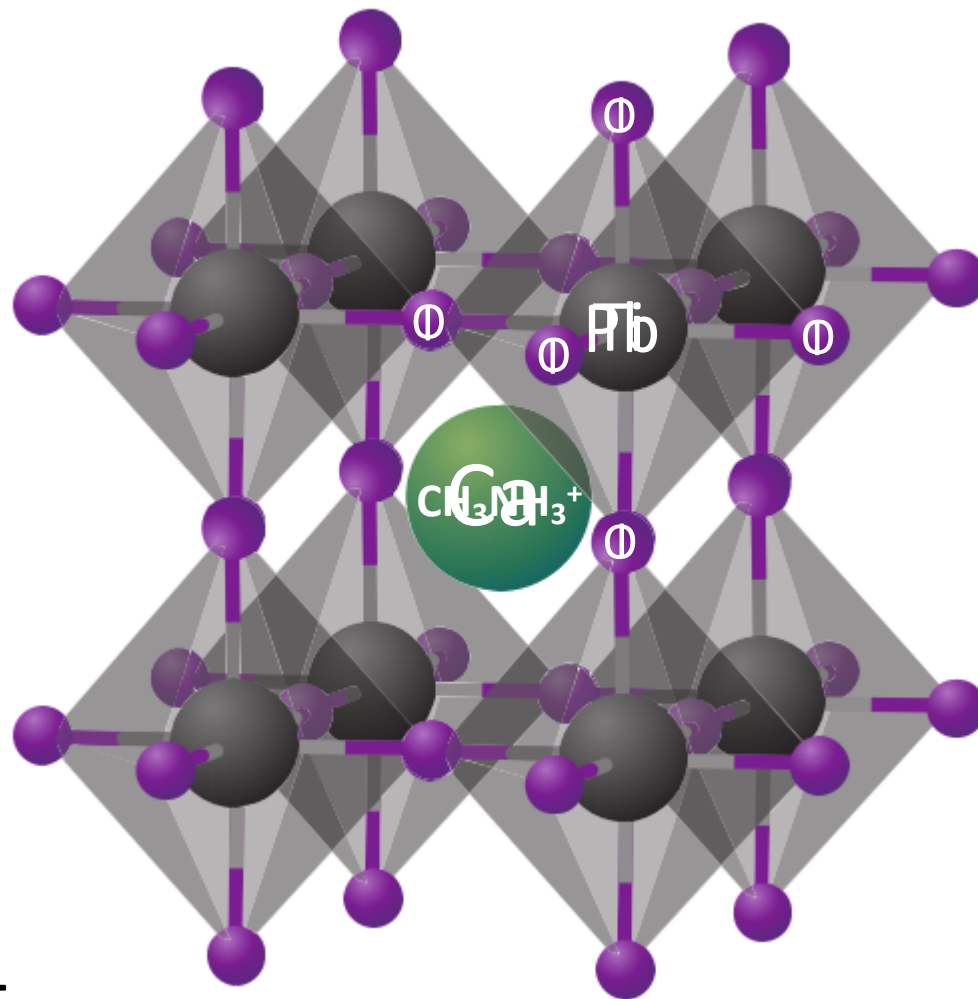




Минерал «перовскит»
(CaTiO_3)



Искусственный
органонеорганический перовскит
($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)

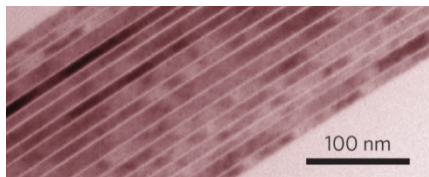




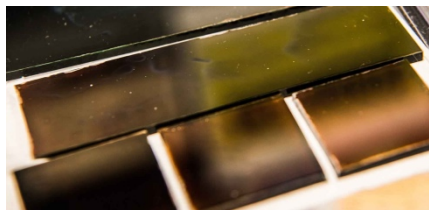
Гибридные перовскиты – новые перспективные материалы для оптоэлектроники и фотовольтаики



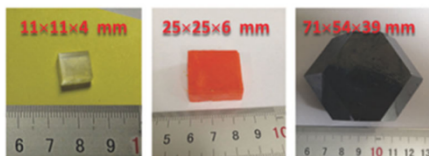
0D: квантовые точки



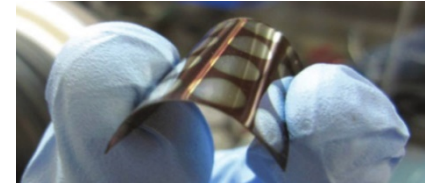
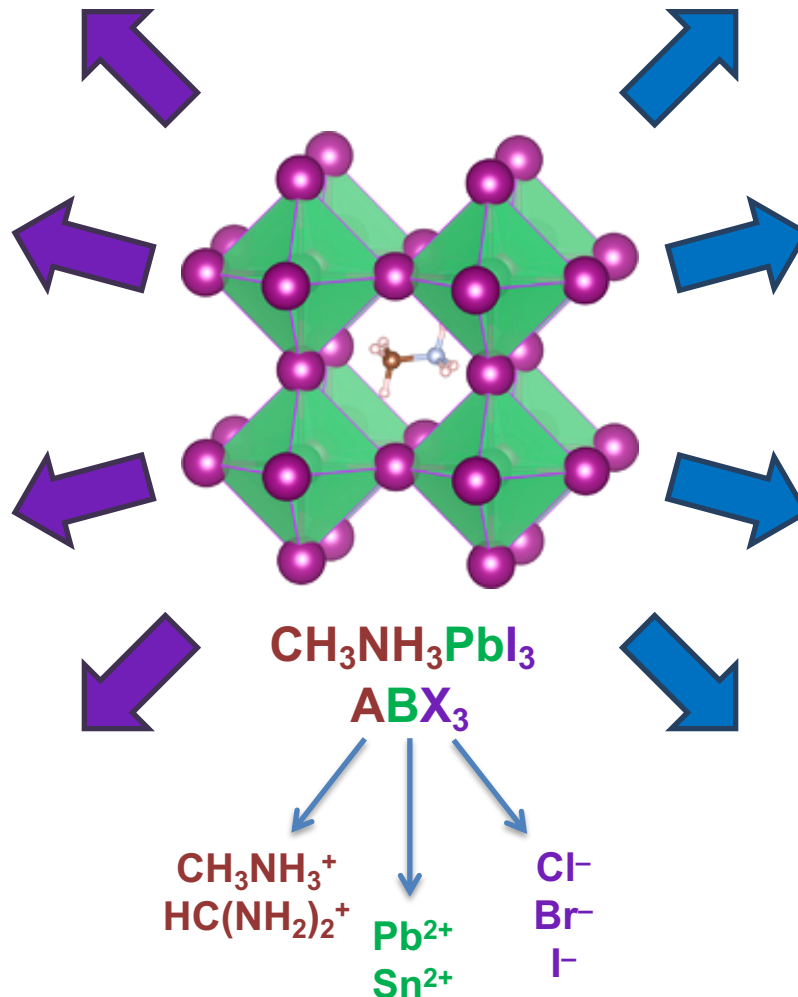
1D: нанонити



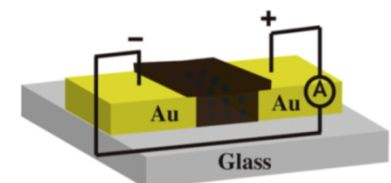
2D: плёнки



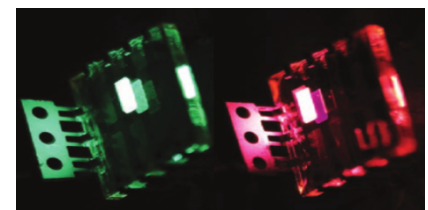
3D: монокристаллы



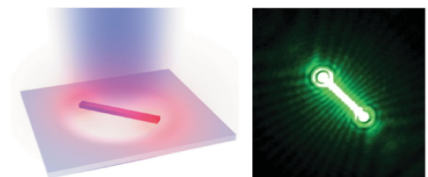
Солнечные ячейки



Фотодетекторы



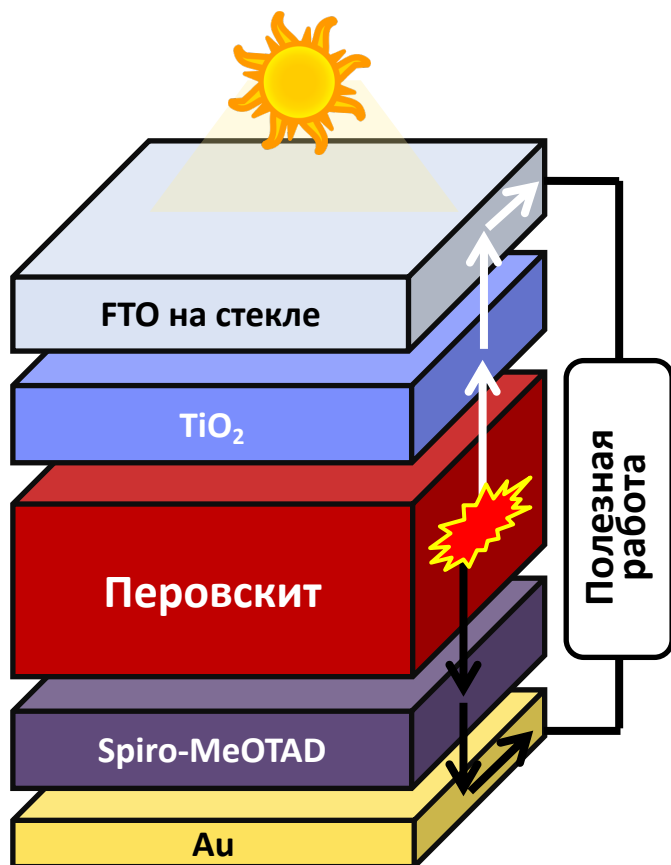
Светодиоды



Лазеры



Перовскитные солнечные элементы: тонкопленочные нанотехнологии



*Микрофотография
поперечного сечения элемента:*

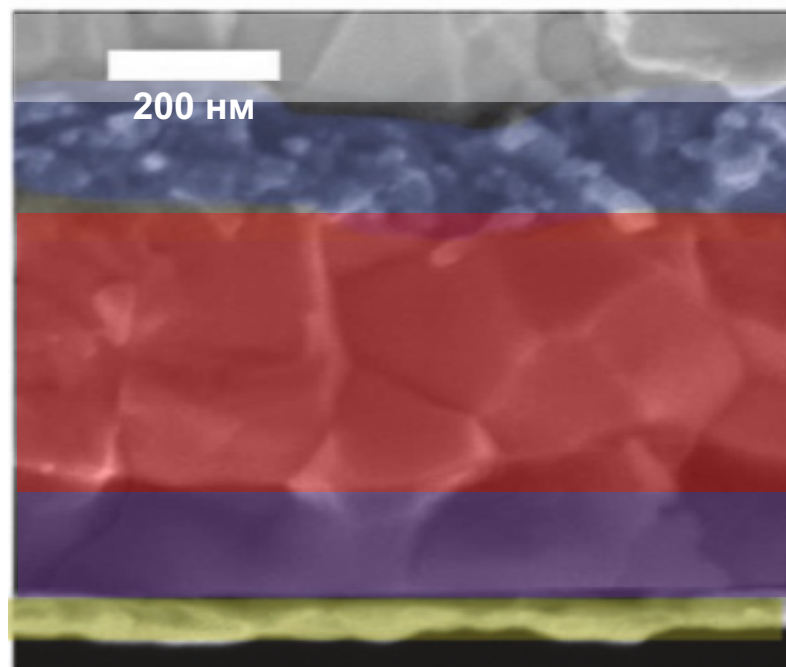
500 нм

150 нм

350 нм

80 нм

50 нм



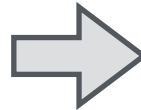


Стадии изготовления перовскитного солнечного элемента



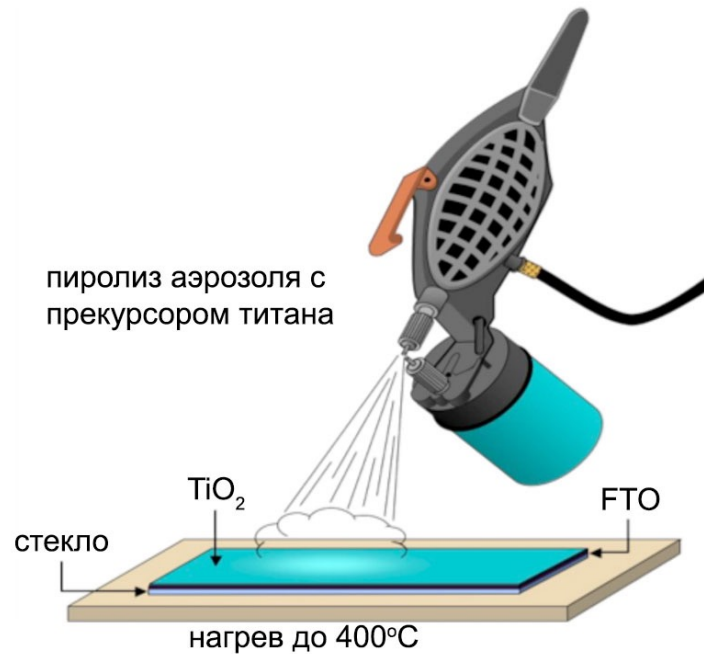
1. Подготовка подложек

Очистка стёкол в ацетоне, спирте

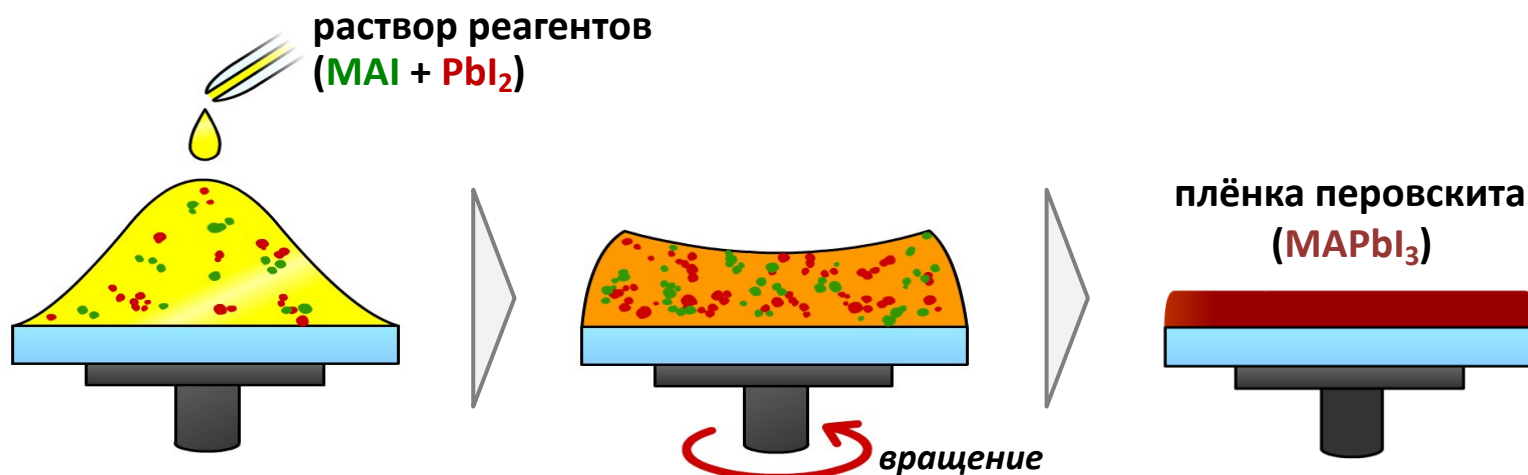


Очистка поверхности в озоне (O_3)

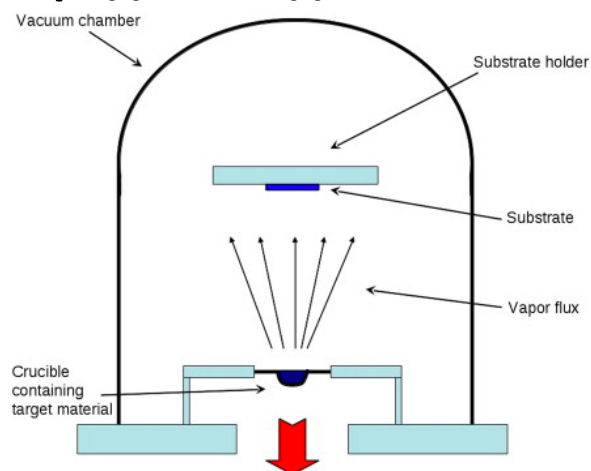
2. Нанесение TiO_2 методом пиролиза аэрозоля



3. Нанесение перовскита методом «спинкоатинга»



4. Нанесение металлического электрода методом напыления вакууме





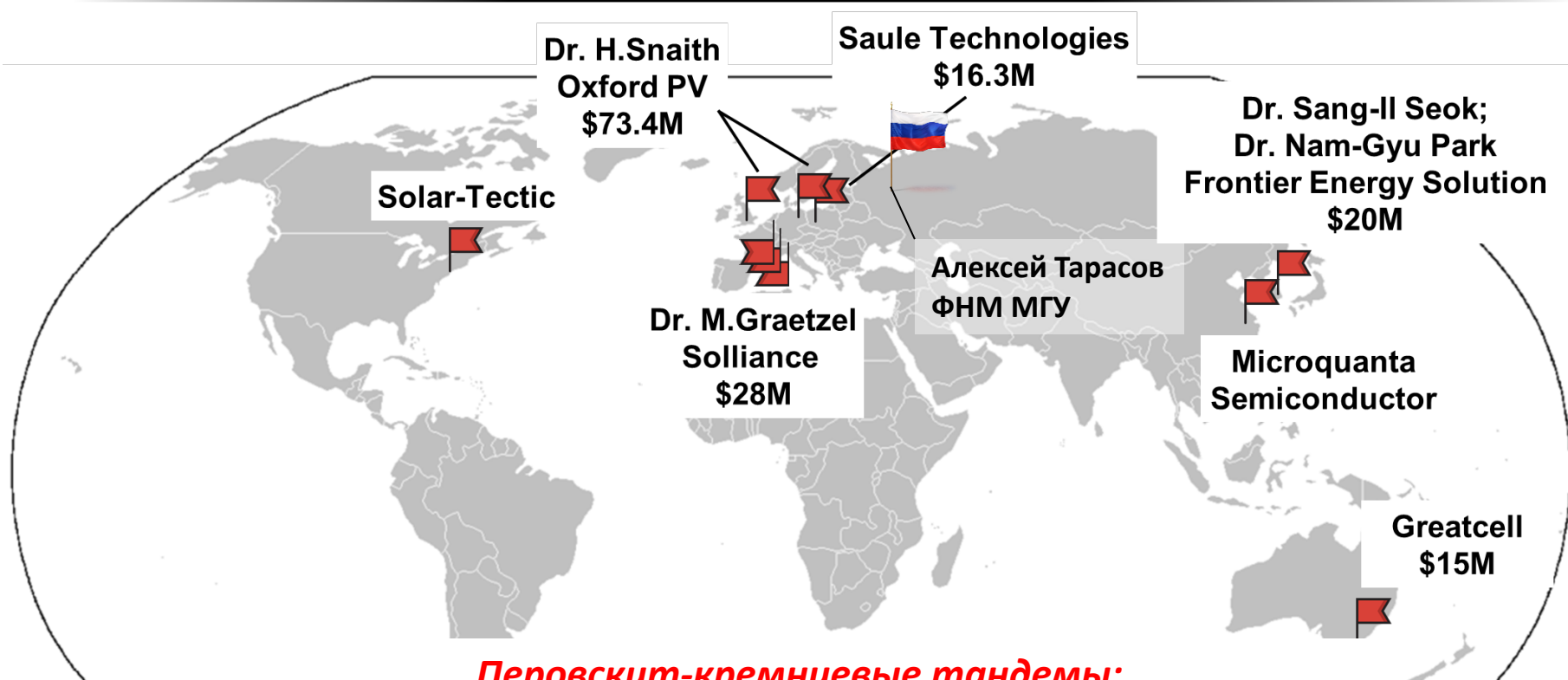
Для создания перовскитной солнечной батареи
требуется очень мало материала



В **одном** автомобильном аккумуляторе содержится столько же свинца,
сколько в перовскитных солнечных батареях площадью **~2000 м²**



Перовскитными элементами занимается более 10 000 учёных,
7 компаний планируют коммерциализацию в ближайшие 5 лет



Перовскит-кремниевые тандемы:



Dr. Henry Snaith

(University of Oxford)

исследования в
области перовскитов
2014-2016

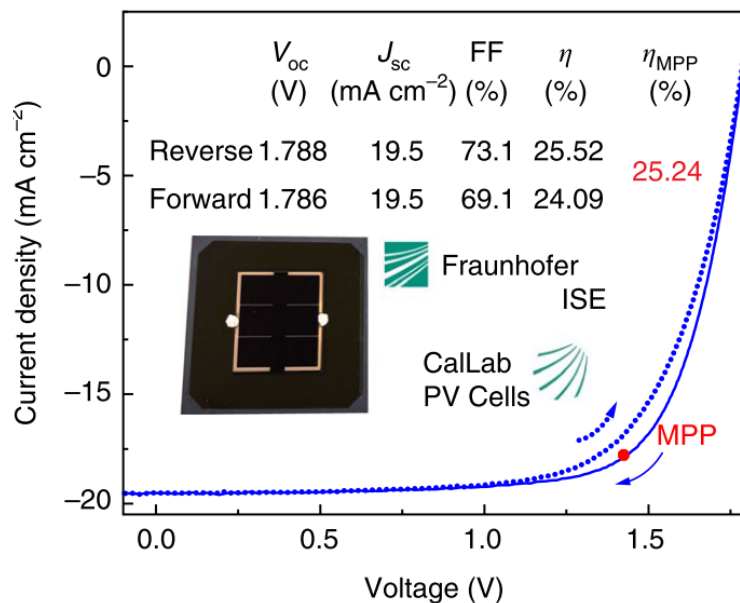
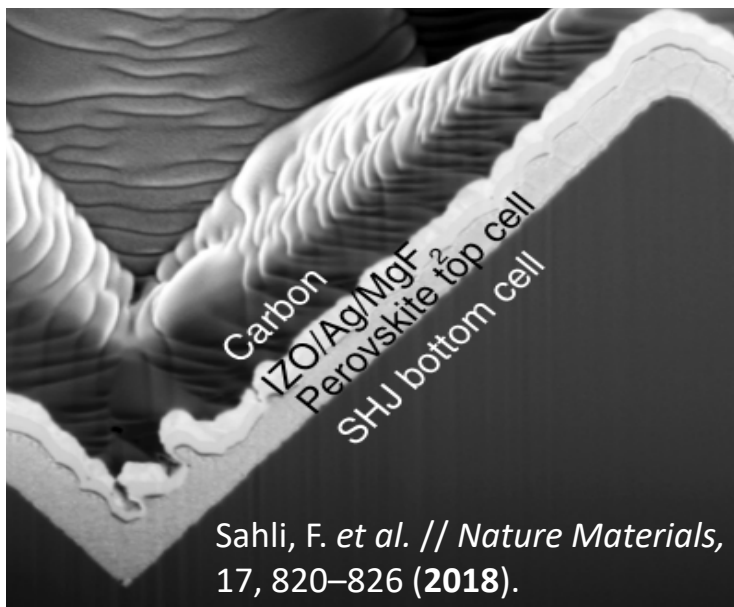
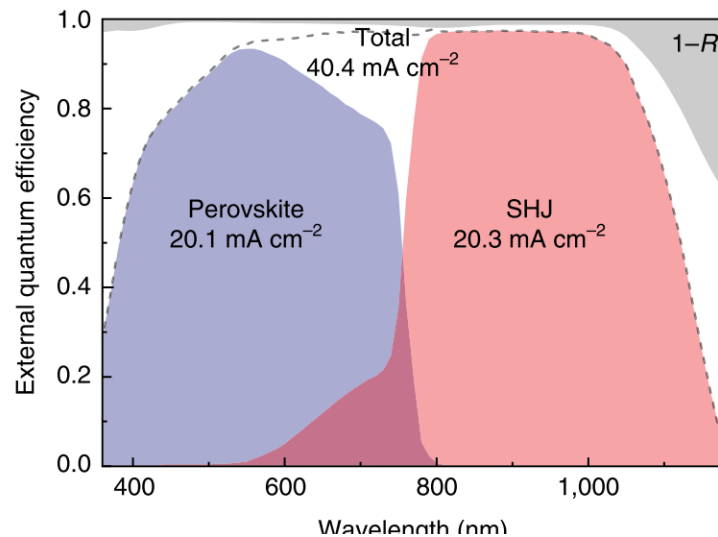
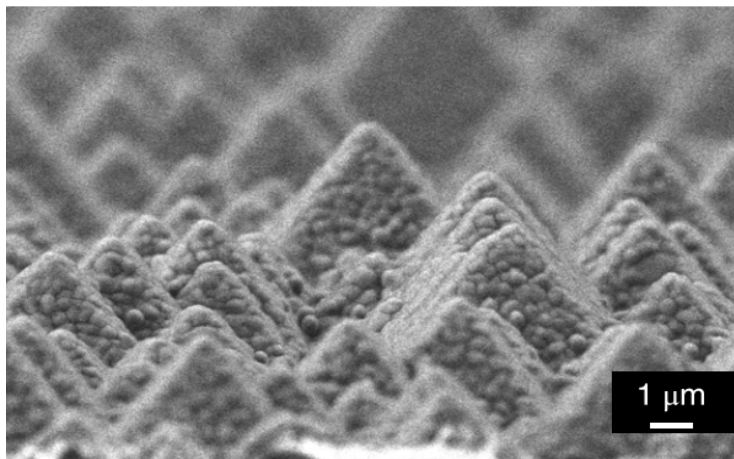
Трансфер
созданных
технологий



- Внешние инвестиции на \$ 68 М
- В 2020 г план вывод на рынок гибридных Si/перовскитных модулей

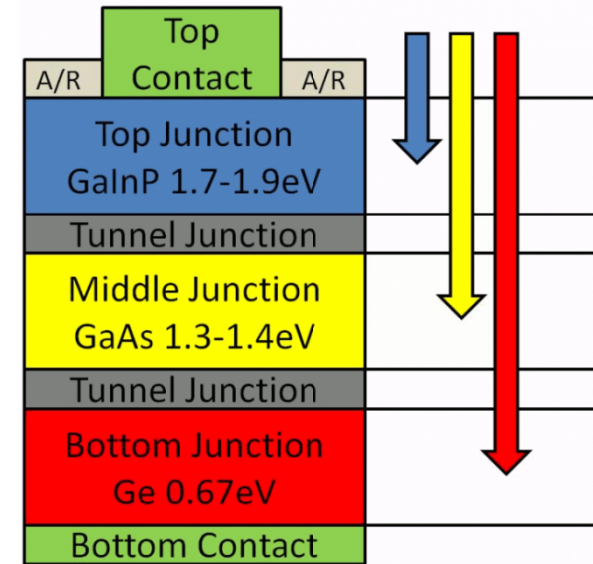
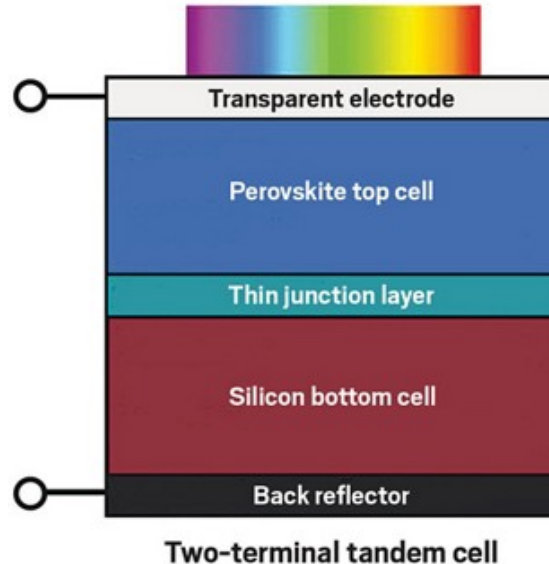
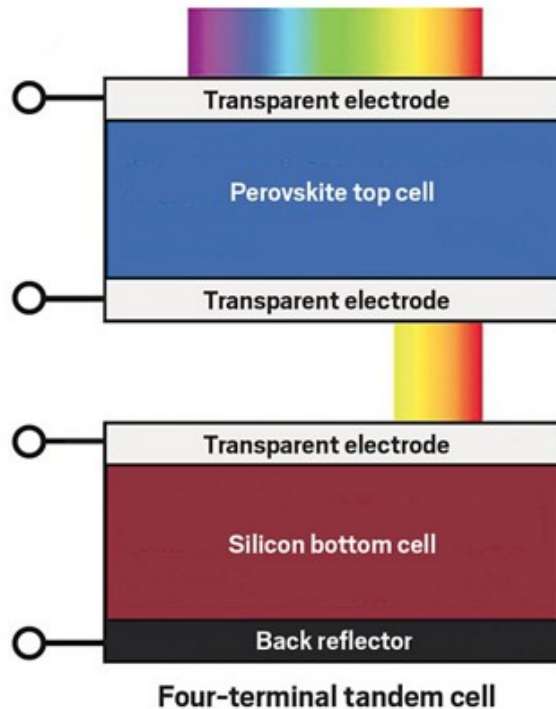


Тандемные солнечные элементы перовскит@Si потенциальный прорыв для кремниевой фотовольтаики





Существуют 2-х и 4-х терминальные перовскит-кремниевые тандемы



A^{III}B^V-гетероструктура (triple-junction cell)

- PV часть стоит <25% стоимости модуля
- ⇒ Выигрышная стратегия для фотовольтаики
это повышение КПД, а не снижение стоимости

- КПД ~40%
- Стоимость 40 000 \$/м²

- ! Текущий рекорд тандемов = 28%
- ! Теоретический предел тандемов > 40%



Разработка перовскит-кремниевых тандемов требует плотной коллаборации с кремниевой индустрией



Изображения: oxfordpv.com



В России исследованиями гибридных перовскитов занимаются всего несколько групп



МГУ

- Инновационные безрастворные методы получения плёнок гибридных перовскитов
- Масштабирование производства перовскитных солнечных элементов
- Фундаментальные исследования химии перовскитов
- Поиск новых стабильных гибридных перовскитов



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

- Перовскитные светодиоды
- Физика фотонных структур на основе гибридных перовскитов

Skoltech

- Поиск безсвинцовых светопоглощающих материалов
- Исследование стабильности гибридных перовскитов



- Создание перовскитных солнечных элементов растворными методами
(начало работ по созданию лаборатории в 2017 году)



Лаборатория новых материалов для солнечной энергетики создана на Факультете наук о материалах МГУ в 2016 г



Коллектив лаборатории:



Наши партнёры:



Prof. M. Graetzel EPFL, Switzerland



Prof. Aldo di Carlo Uni Tor Vergata, Italy



Dr. Ivan Turkevych CEREBE, Japan



Prof. Yasuhiro Shirai NIMS, Japan



Prof. Henk Bolink Uni Valencia, Spain



Prof. Chen Qi BIT, China

Последние публикации:

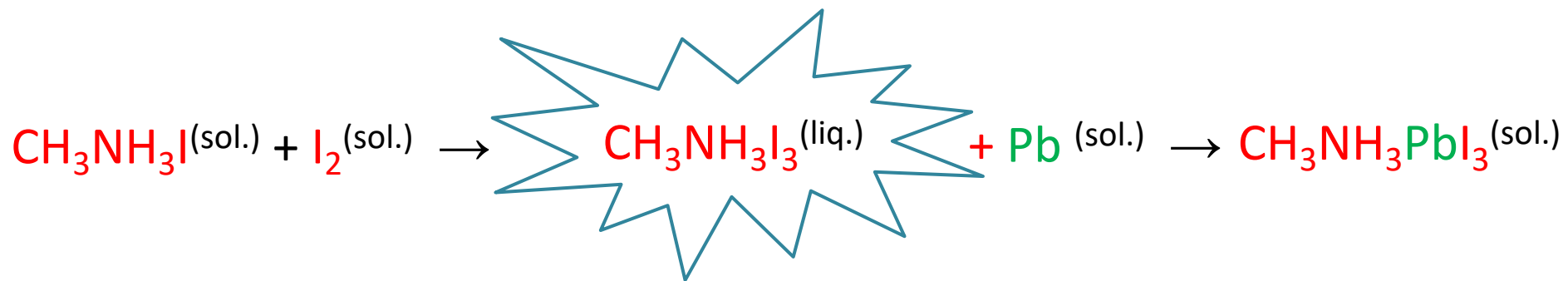
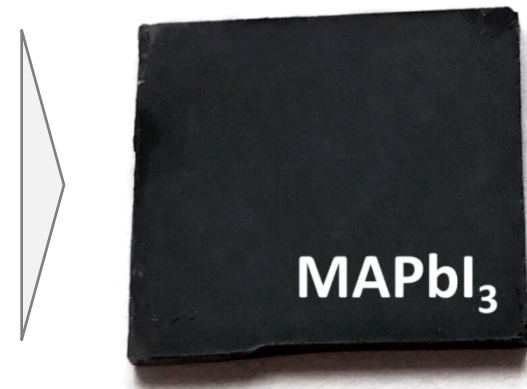
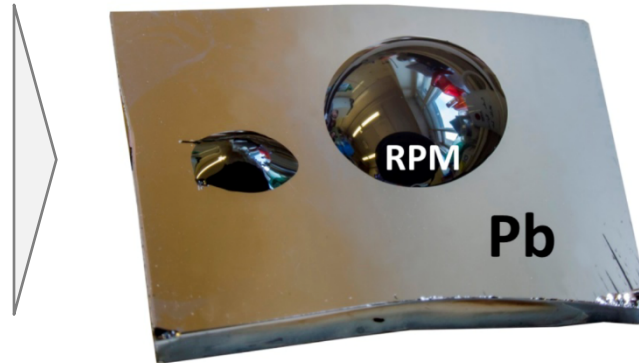
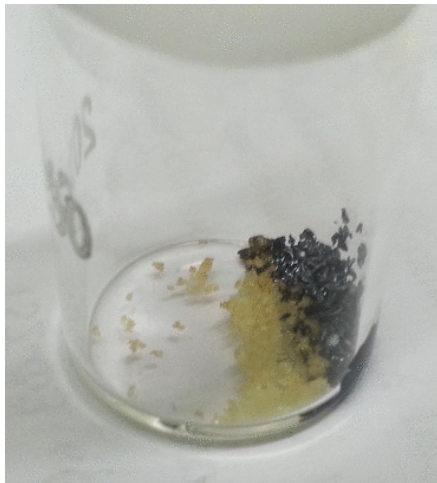
- From metallic lead films to perovskite solar cells through lead conversion with polyhalides solutions // **ACS Appl. Mater. Interfaces** (IF = 8.5), 2020;
- New features of photochemical decomposition of hybrid lead halide perovskites by laser irradiation // **ACS Appl. Mater. Interfaces** (IF = 8.5), 2020;
- Strategic advantages of reactive polyiodide melts for scalable perovskite photovoltaics. // **Nature Nanotechnology** (IF = 37.5), 2019;
- Methylammonium Polyiodides: Remarkable Phase Diversity // **Journal of Physical Chemistry Letters** (IF = 8.7), 2019.

За 4 года работы:

- 30 статей
- 12 патентов
- 4 международных стажировки студентов (Швейцария, Япония)

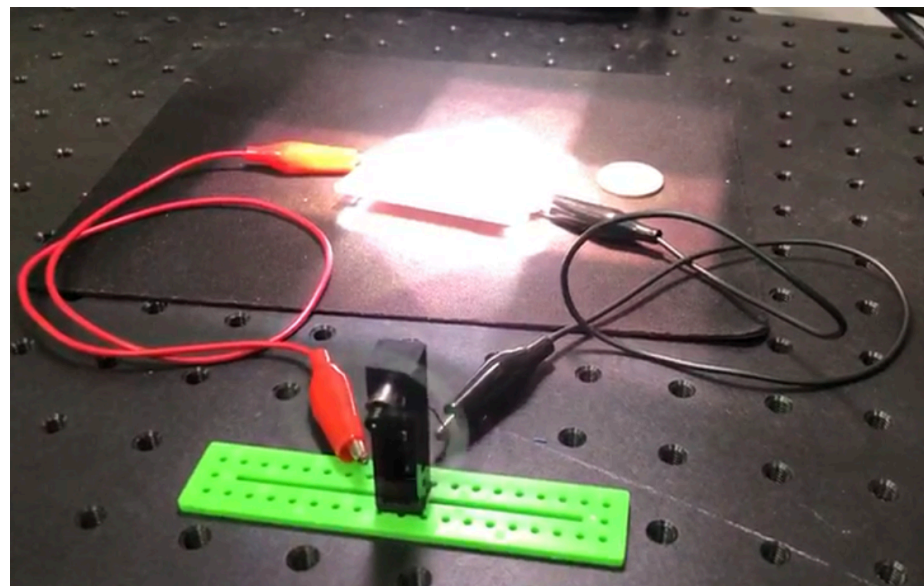
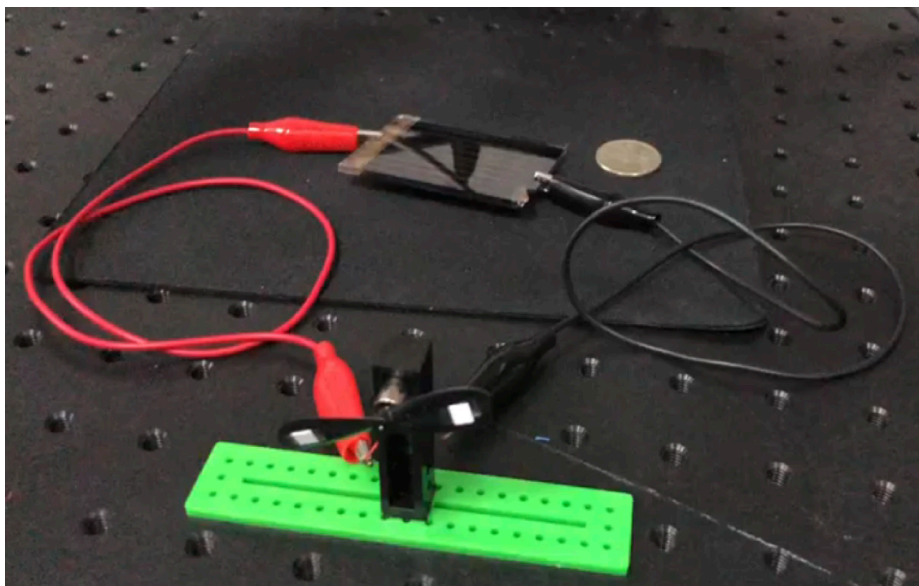


В 2016 году Лабораторией был открыт принципиально новый класс реагентов для синтеза перовскита



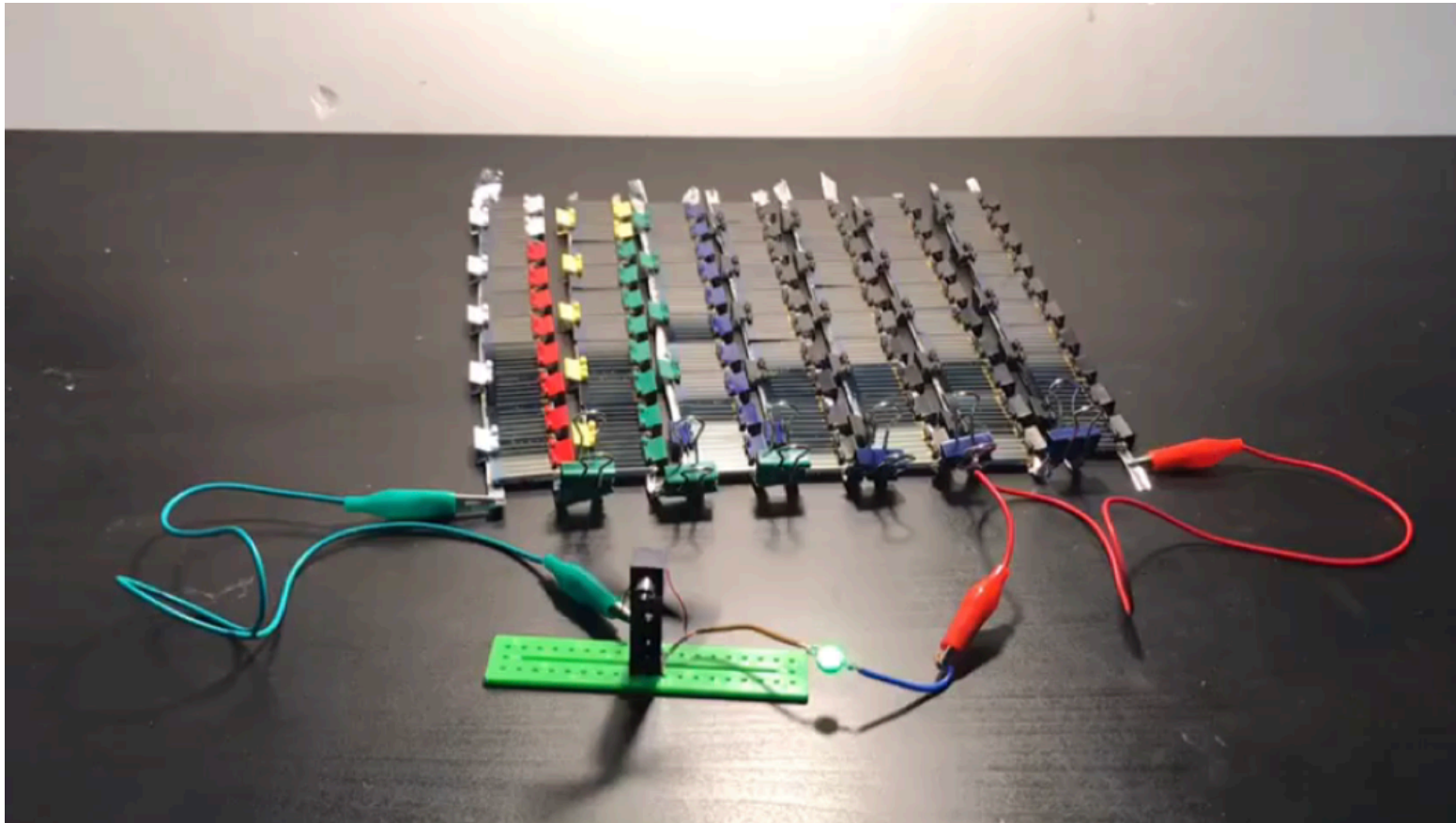


На основе открытых реагентов мы разработали и запатентовали
собственную технологию создания солнечных элементов





На основе открытых реагентов мы разработали и запатентовали
собственную технологию создания солнечных элементов



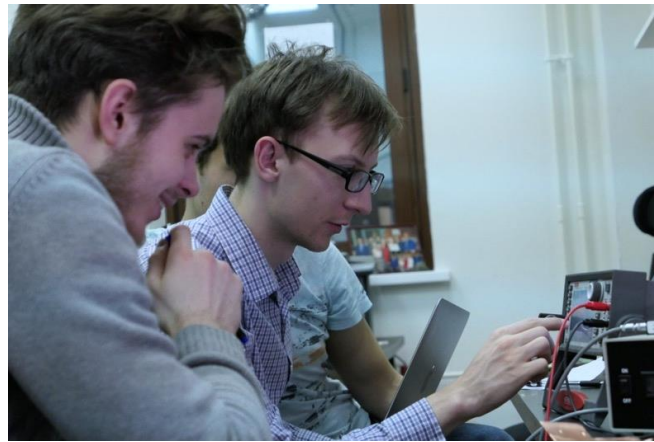
- модуль из 70 элементов
- 200 см² активной площади
- средний КПД > 13%



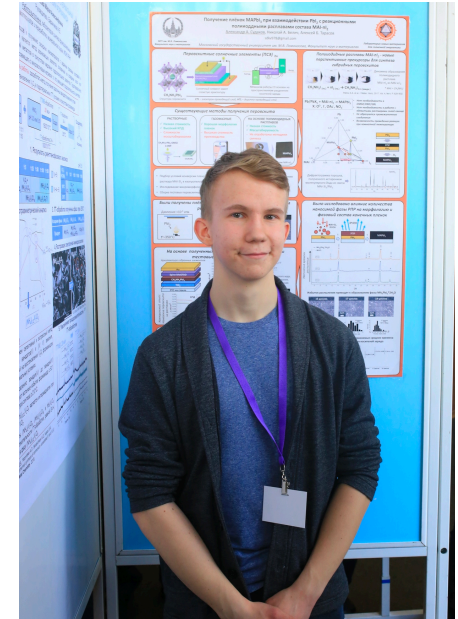
Что такое быть учёным?



Синтезировать новые материалы



Проводить измерения на приборах



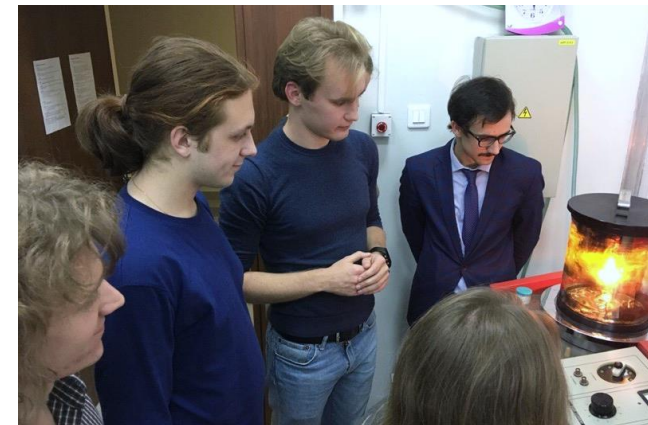
Выступать на конференциях



Анализировать и обсуждать результаты



Оказываться в интересных местах



Наблюдать новые явления



Чего можно добиться?



Занимать призовые места на конференциях и конкурсах



**Российский
научный фонд**



Выигрывать гранты на выполнение научных исследований

**nature
nanotechnology**

ARTICLES

<https://doi.org/10.1038/s41565-018-0304-y>

Strategic advantages of reactive polyiodide melts for scalable perovskite photovoltaics

Ivan Turkevych^{1,2,8}, Said Kazaoui^{3,8}, Nikolai A. Belich⁴, Aleksei Y. Grishko⁴, Sergey A. Fateev⁴, Andrey A. Petrov⁴, Toshiyuki Urano¹, Shinji Aramaki¹, Sonya Kosar⁵, Michio Kondo³, Eugene A. Goodilin^{4,6}, Michael Graetzel⁷ and Alexey B. Tarasov^{4,6*}

Despite tremendous progress in efficiency and stability, perovskite solar cells are still facing the challenge of upscaling. Here we present unique advantages of reactive polyiodide melts for solvent- and adduct-free reactionary fabrication of perovskite films exhibiting excellent quality over large areas. Our method employs a nanoscale layer of metallic Pb coated with stoichiometric amounts of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ (MAI) or mixed $\text{CsI}/\text{MAI}/\text{NH}_4\text{CH}_2\text{NH}_2\text{I}$ (FAI), subsequently exposed to iodine vapour. The instantly formed $\text{MAI}_{0.50}$ or $\text{Cs}(\text{MA}_x\text{FA}_{1-x})_{0.50}$ polyiodide liquid converts the Pb layer into a pure perovskite film without byproducts or unreacted components at nearly room temperature. We demonstrate highly uniform and relatively large area MAPbI_3 perovskite films, such as 100 cm^2 on glass/fluorine-doped tin oxide (FTO) and 600 cm^2 on flexible polyethylene terephthalate (PET)/indium tin oxide (ITO) substrates. As a proof-of-concept, we demonstrate solar cells with reverse scan power conversion efficiencies of 16.12% (planar MAPbI_3), 17.18% (mesoscopic MAPbI_3) and 16.89% (planar $\text{Cs}_{0.05}\text{MA}_{0.1}\text{FA}_{0.75}\text{PbI}_3$) in the standard FTO/c(m)-TiO₂/perovskite/spiro-OMeTAD/Au architecture.

The meteoric rise of the power conversion efficiencies (PCE) of perovskite solar cells (PSCs) from 3.8% to over 23% in less than a decade has made them superstars and stunned the photovoltaic community^{1–4}. Techno-economic models predict a significant cost reduction potential for perovskite photovoltaic (PV) modules⁵. Strong expectations are also put on perovskite tan-

2. Combination reaction of two halides: $\text{PbI}_{2(\text{soln})} + \text{MAI}_{(\text{soln})} \rightarrow \text{MAPbI}_{3(\text{soln})}$ (that is, dipping of PbI_2 films into MAI solution in isopropanol (IPA))¹⁶, annealing of PbI_2 in MAI vapour by hybrid CVD¹⁷, co-evaporation of PbI_2 and MAI¹⁸, and so on)

These methods are implemented in many different flavours;

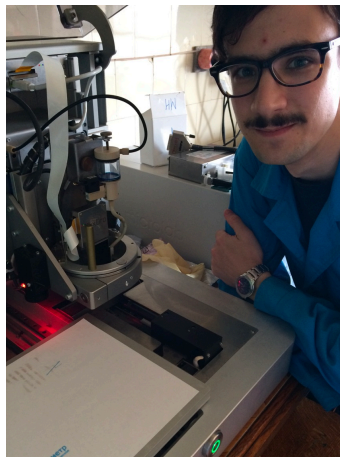
Публиковать статьи в престижных журналах



Получать премии!



**окончил Аничков лицей
(Санкт-Петербург, 2011)**



**поступил в магистратуру
ФНМ МГУ (2015)**



**стажировка в Швейцарии
(3 месяца)**



**опубликовал первую
научную статью (2016)**



**получил Премию
Правительства Москвы (2018)**

- 18 научных статей
- 6 патентов
- 26 докладов на конференциях
- 2 стажировки
- руководитель первого гранта

Спасибо за внимание!



Факультет наук о материалах МГУ

<http://fnm.msu.ru>



NMSE

*Лаборатория новых материалов
для солнечной энергетики*

<http://nmse-lab.ru>



[@nmselab](https://www.instagram.com/nmselab)

alexey.bor.tarasov@gmail.com

