
Литий-ионные аккумуляторы для электротранспорта

Артем Абакумов

Центр энергетических технологий, Сколтех

Технологические барьеры для ЛИА

Дорожная карта НТИ	Технологические барьеры для накопителей
Аэронет	Устойчивая работа при температуре от -50 до +50°C, энергоемкость не хуже 450 Вт*ч/кг, скорость разряда более 2С при накоплении удельной энергии не менее 200 Вт*ч/кг, либо более 5С и не менее 150 Вт*ч/кг, либо более 20С и не менее 100 Вт*ч/кг.
Автонет	Преодоление расстояний электромобилем более 600 км без подзарядки, время заряда не более 3 минут (до 80%), количество циклов заряда не менее 20 000, температурный режим -50°...+65°C
Маринет	Нет
Энерджинет	Мощность 10 - 100 кВт, энергоемкость не менее 40 - 800 кВт·ч, время зарядки/разрядки не менее 8 ч, КПД не менее 95%, глубина разряда не менее 80%, ресурс не менее 4000 циклов (при глубине разряда 80% и остаточной емкости по исчерпанию ресурса не менее 70% от номинальной), срок службы не менее 12 лет, стоимость энергоемкости не более \$350 за кВт·ч

Электротранспорт с ограниченным плечом пробега

12-метровые электробусы с подзарядкой от пантографа

Сравнительно небольшая батарея, но необходим высокий ресурс по циклированию

Официальное ТЗ от Мосгортранса

<http://www.mosgortrans.ru/about/projects/electrobus/>

- Энергоёмкость ЛИАБ 70 кВтч (косвенно из п.2.3)
- Время заряда на 50% ёмкости: 12 минут (соответствует зарядному току 2.5С)
- **Расход электроэнергии на тягу: до 1.5 кВтч/км, общий: до 2.7 кВтч/км**
- Срок службы электробуса: 15 лет или 1 млн. км пробега

При дневном пробеге 200 км :

6-8 полных циклов заряда-разряда в день,
37 тыс. циклов за 15 лет (350 дней/год)

Электробусы КАМАЗ-6282 и ЛИАЗ-6274

ЛИАБ 80 кВтч DriveElectro

на ЛИА Toshiba SCIB (20 Ач) с LTO анодами

- Ресурс 15000 циклов (ток 5С, 100% DOD, данные Toshiba)
- Возможность зарядки при отрицательных температурах



Легковой электротранспорт

Li-ионная батарея Nissan Leaf

Пробег	Энергоемкость	Заряд
160 км	30 кВтч (~ 300 кг)	домашний: 220В, 30А, 5 час. на зарядной станции: 480В, 125А, 0.5 час
по техбарьерам Автонет:		
600 км	112 кВтч	домашний: 220В, 30А, 17 час. на зарядной станции: 480В, 3.7 кА , 3 мин. (80%)

Ресурс батареи по техбарьерам Автонет:

- 20000 зарядно-разрядных циклов
- 1 цикл / 2 дня

~ 110 лет

средняя продолжительность жизни в России - 71.6 года



Удельная энергия/удельная мощность

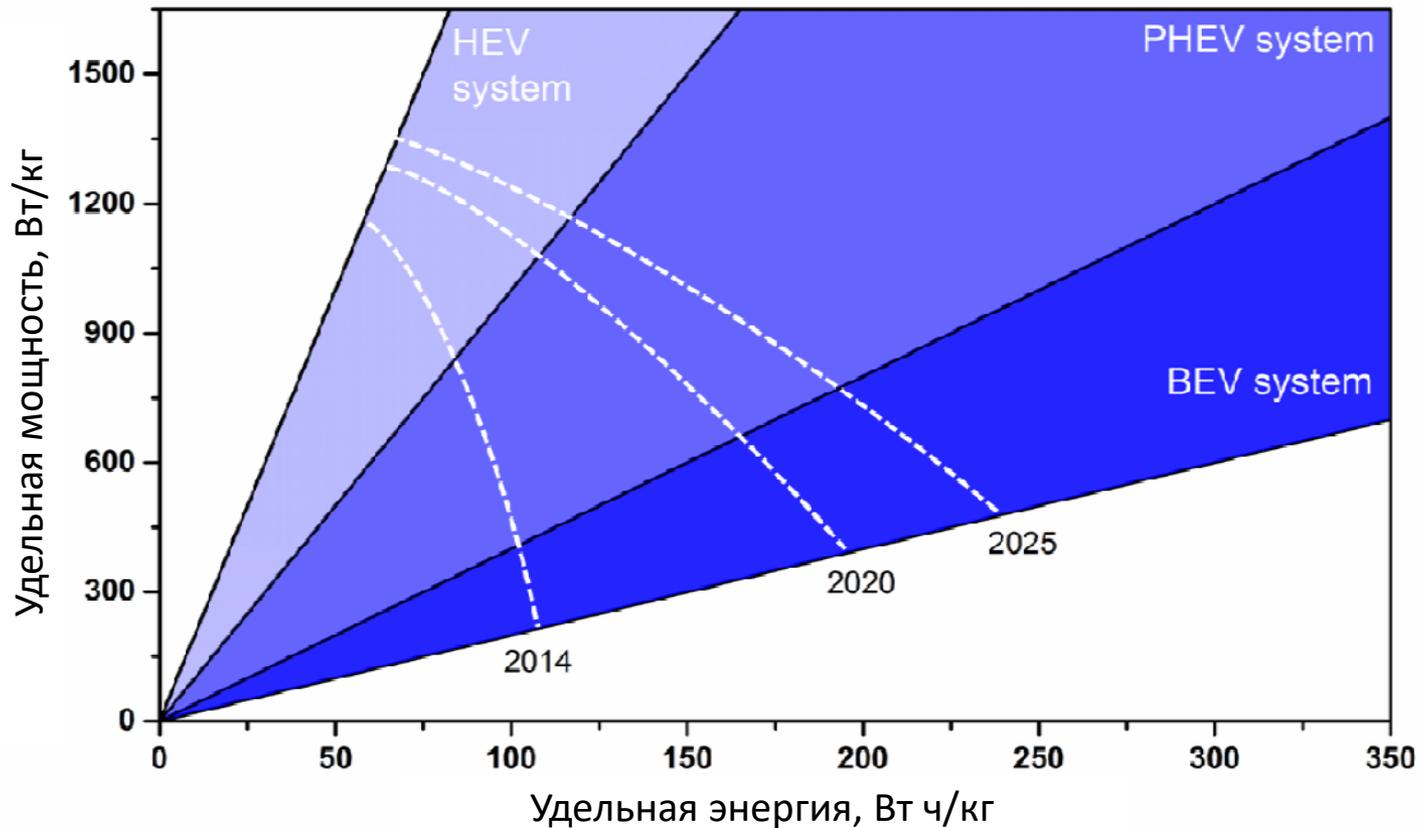
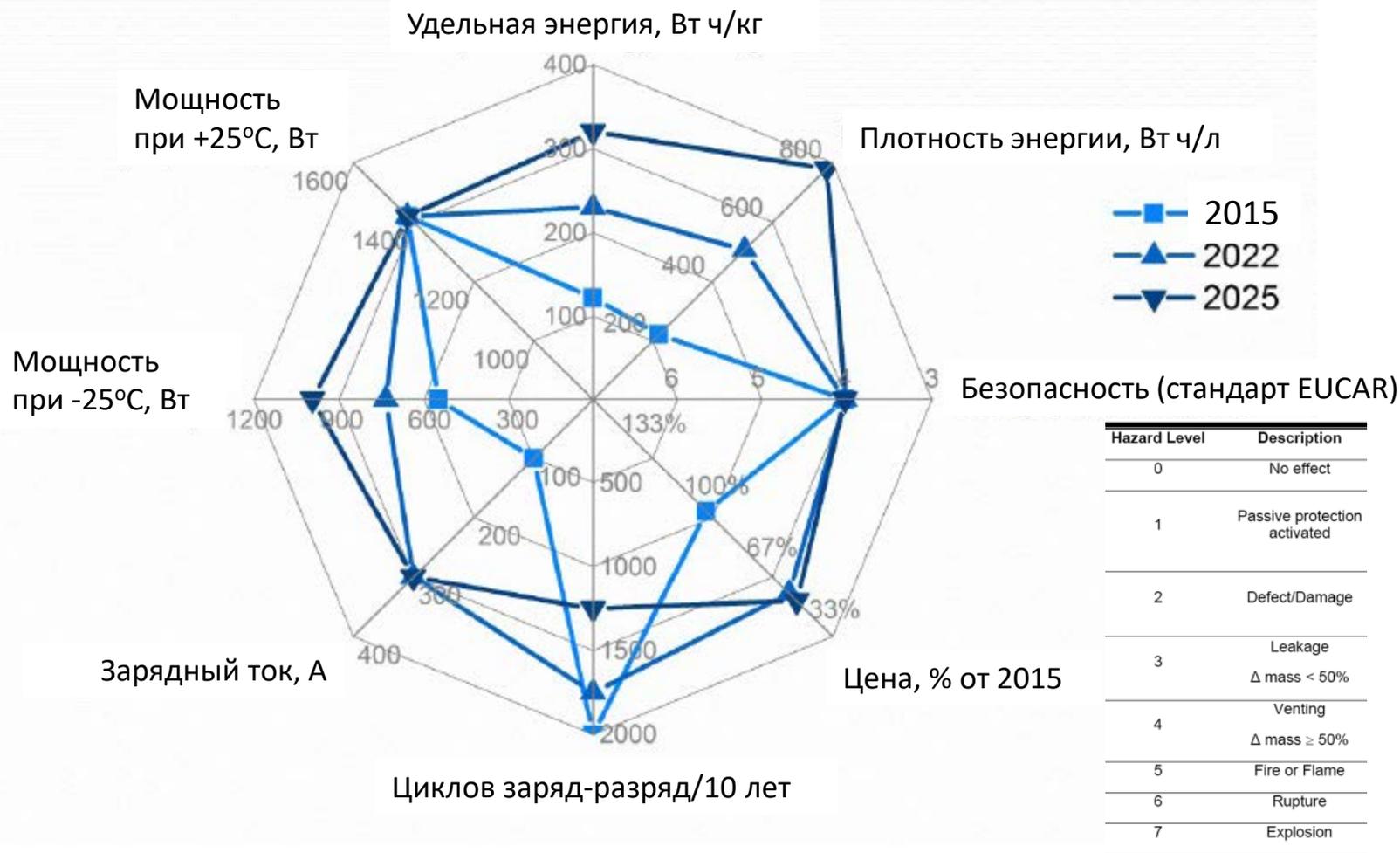


Диаграмма удельной энергии/мощности аккумулятора в зависимости от типа электромобиля и прогноз на 2020 – 2025 гг.

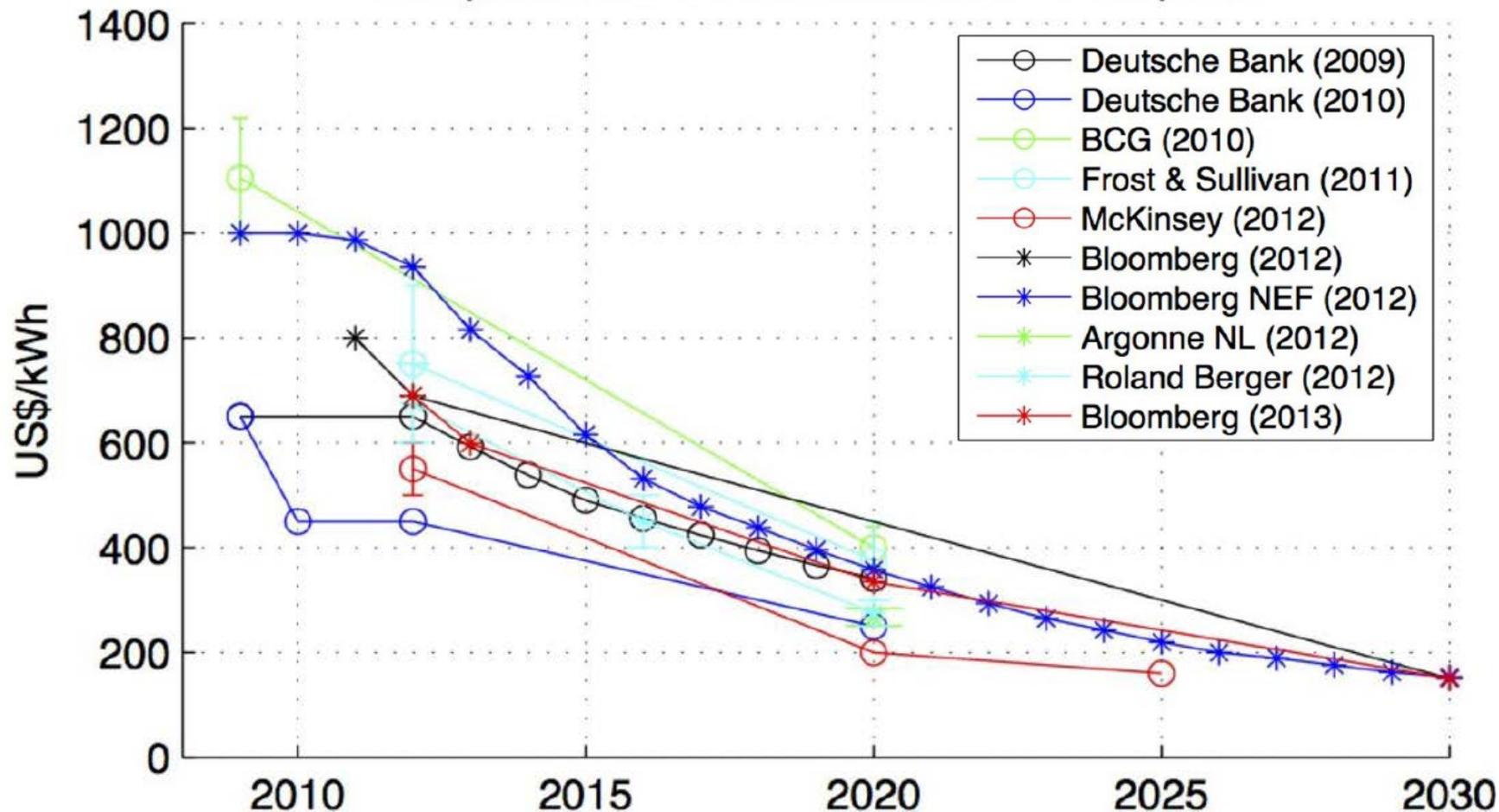
Эволюция основных параметров



Ключевые параметры аккумулятора для электромобилей (данные на 2015 г – BMW i3)

Фактор цены

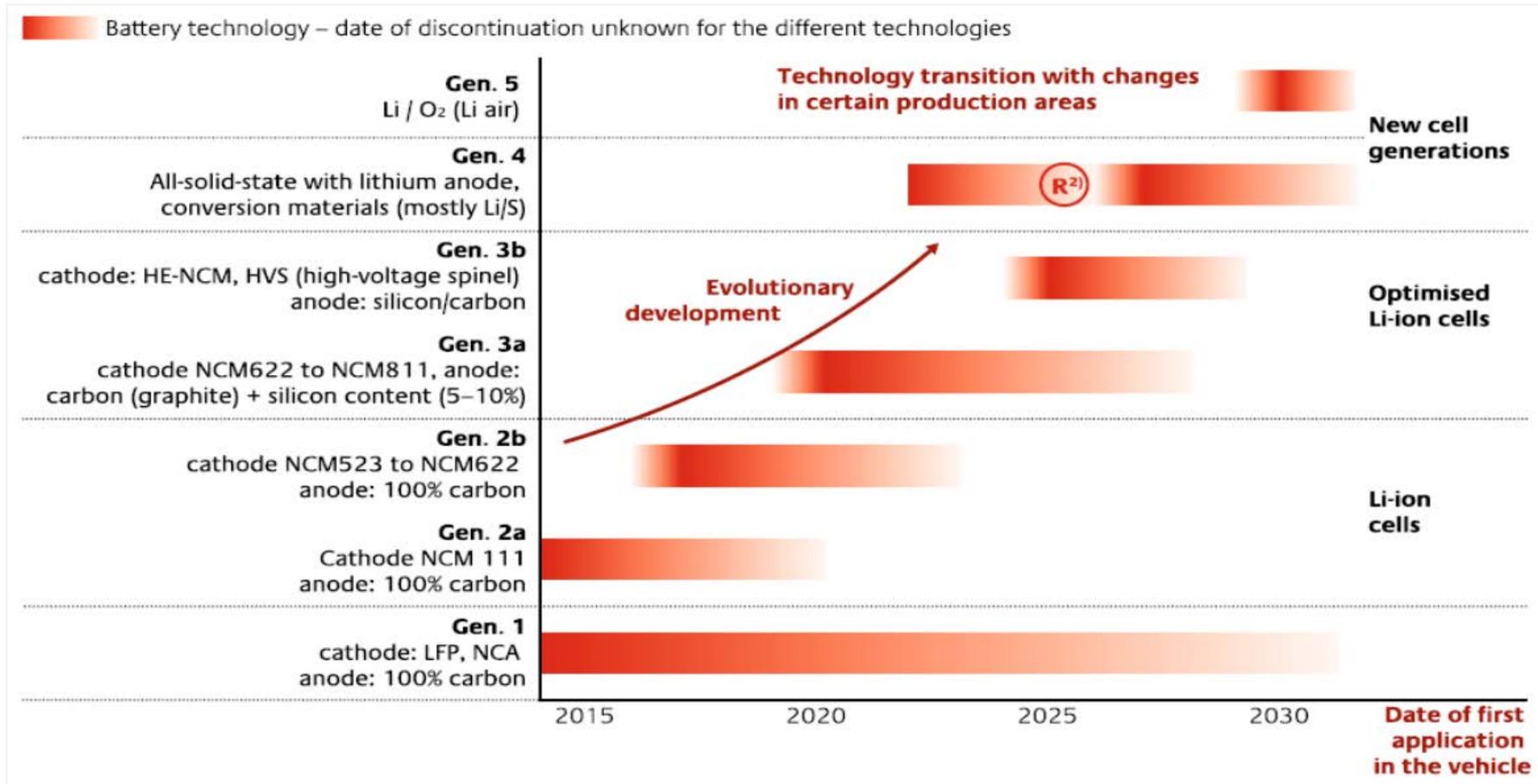
Cost predictions for full automotive Li-ion packs



Характеристики основных типов ЛИА

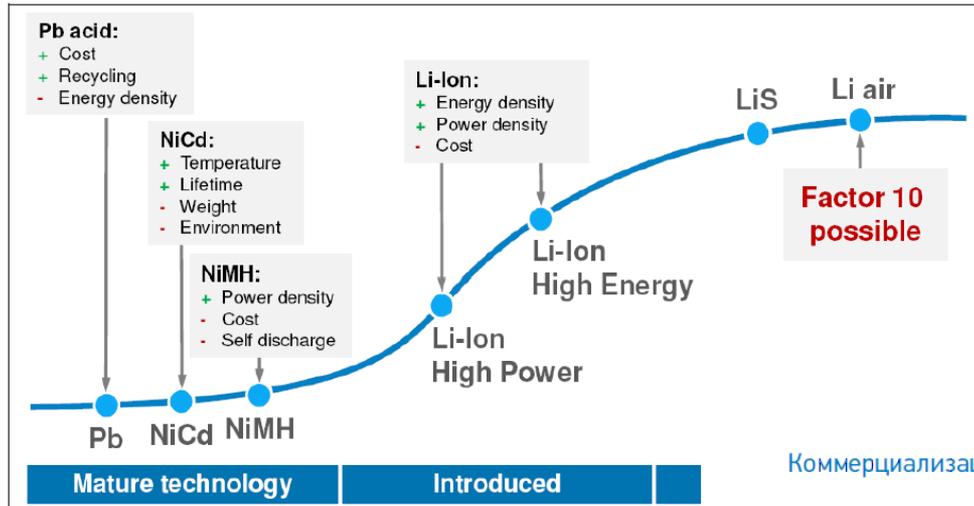
	«Традиционные» (LCO/C, NMC/C, NCA/C, LMO/C, (NMC-LMO)/C)	«Литий-железо- фосфатные» LFP/C	«Литий-титанатные» NMC/LTO, LMO/LTO
Напряжение (номинал)	3.6...3.7 В	3.2...3.3 В	2.3...2.4 В
Удельная энергоёмкость	140-260 Втч/кг	90-120 Втч/кг	70-100 Втч/кг
Количество циклов заряда/разряда	300...5000	500...5000	до 20000
Безопасность	Средняя	Высокая	Очень высокая
Стоимость ЛИАБ	от 200 USD/кВтч	от 200 USD/кВтч	от 1000 USD/кВтч
Применение	(1) Мобильные устройства (2) Легковые EV (3) Стационарные накопители	(1) Электробусы, легковые EV (2) Стационарные накопители	(1) Легковые EV, электробусы (2) Гибридные локомотивы
Доля рынка	~ 90%	~ 10%	~ 1%
Особенности	В зависимости от применения: <ul style="list-style-type: none"> • ЛИА высокой энергии • ЛИА высокой мощности 		ЛИА высокой мощности возм. заряд при $T < 0^{\circ}\text{C}$

Технологии для электротранспорта

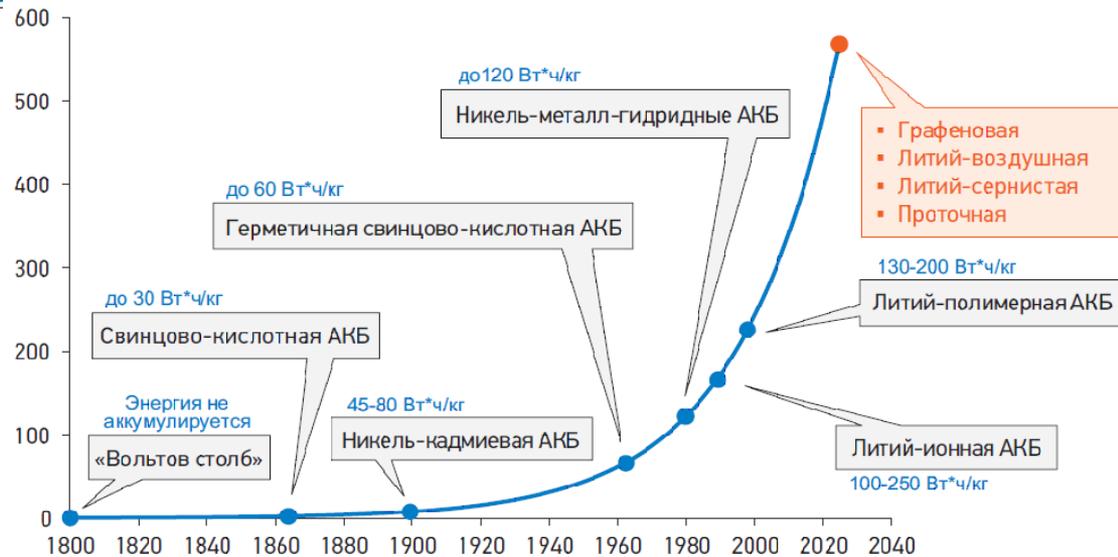


Технологии для электротранспорта

Battery technology roadmap



Коммерциализация различных типов батарей и их удельная энергоёмкость, Вт*ч/кг

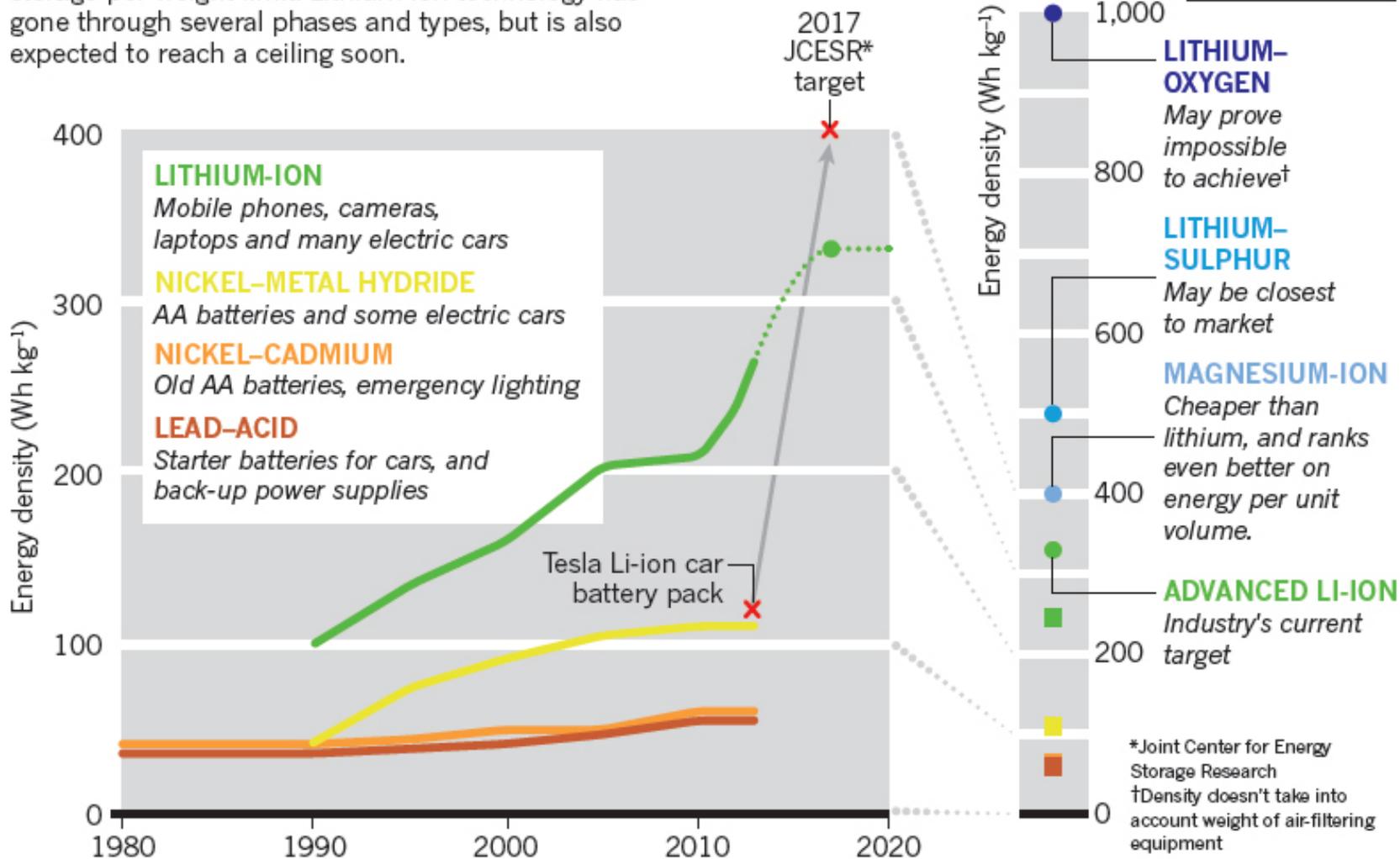


Источник: VYGON Consulting

Прогнозы по технологиям

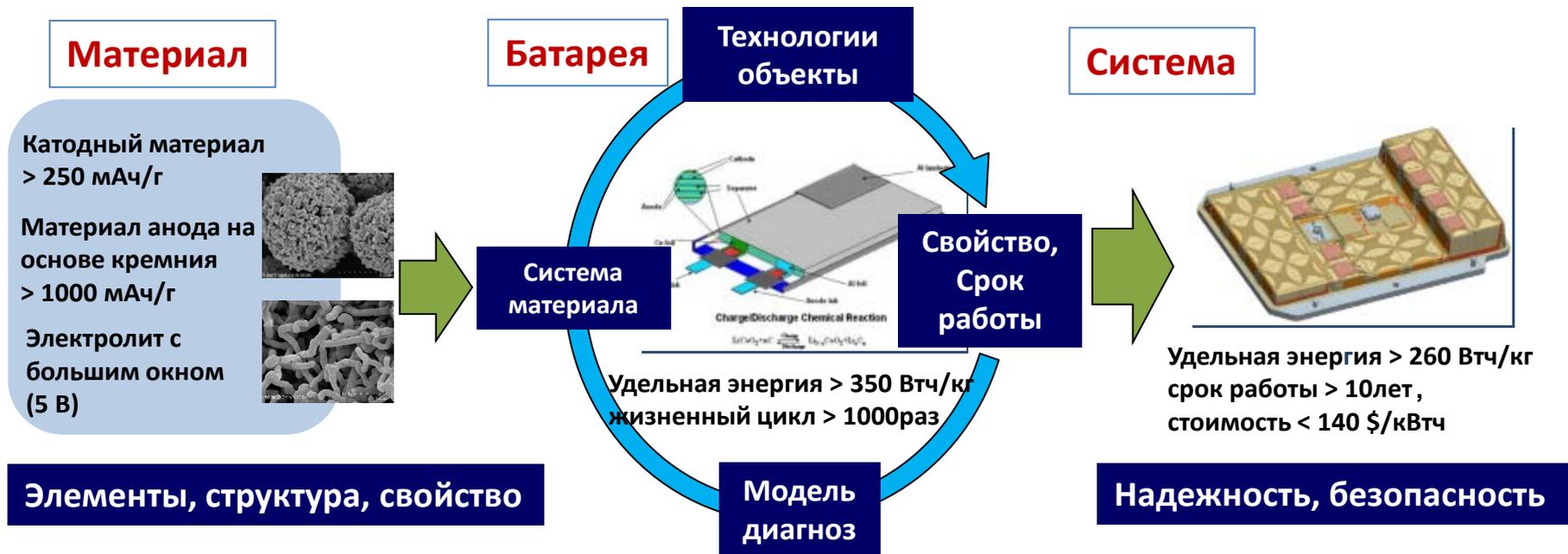
POWERING UP

Portable rechargeable batteries tend to hit an energy-storage-per-weight limit. Lithium-ion technology has gone through several phases and types, but is also expected to reach a ceiling soon.



Технологические барьеры

China Automotive Battery Research Institute (CABRI) in 2020:



Наши предложения для НТИ (октябрь 2016):

на перспективу 2025-2030 гг. можно сформулировать преодоление следующих технологических барьеров: **удельная энергоемкость 250 – 350 Втч/кг при сроке работы батареи 8-10 лет и удельной стоимости запасенной энергии 160 – 175 \$/кВтч.**

Технологические барьеры

Ячейки аккумулятора CABRI

Параметры	Единица	Литий-ионный аккумулятор 180	Литий-ионный аккумулятор 230	Литий-ионный аккумулятор 260	Литий-ионный аккумулятор 300
Размер	мм	227*165*8.1	227*165*8.1	310*103*11.6	310*103*11.6
Емкость	Ач	25	32	51	60
Рабочее напряжение	В	3.65	3.6	3.6	3.55
Удельная энергия	Втч/кг	180	230	260	300
Удельная мощность	Вт/кг	2000	1500	1500	1500
Жизненный цикл	Циклов	2000	1500	1500	1500
Рабочая температура	°С	-30~55	-30-55	-30-55	-30-55
Дата серийного производства		09.2015	09.2017	05.2018	05.2019

Новые решения на уровне материалов

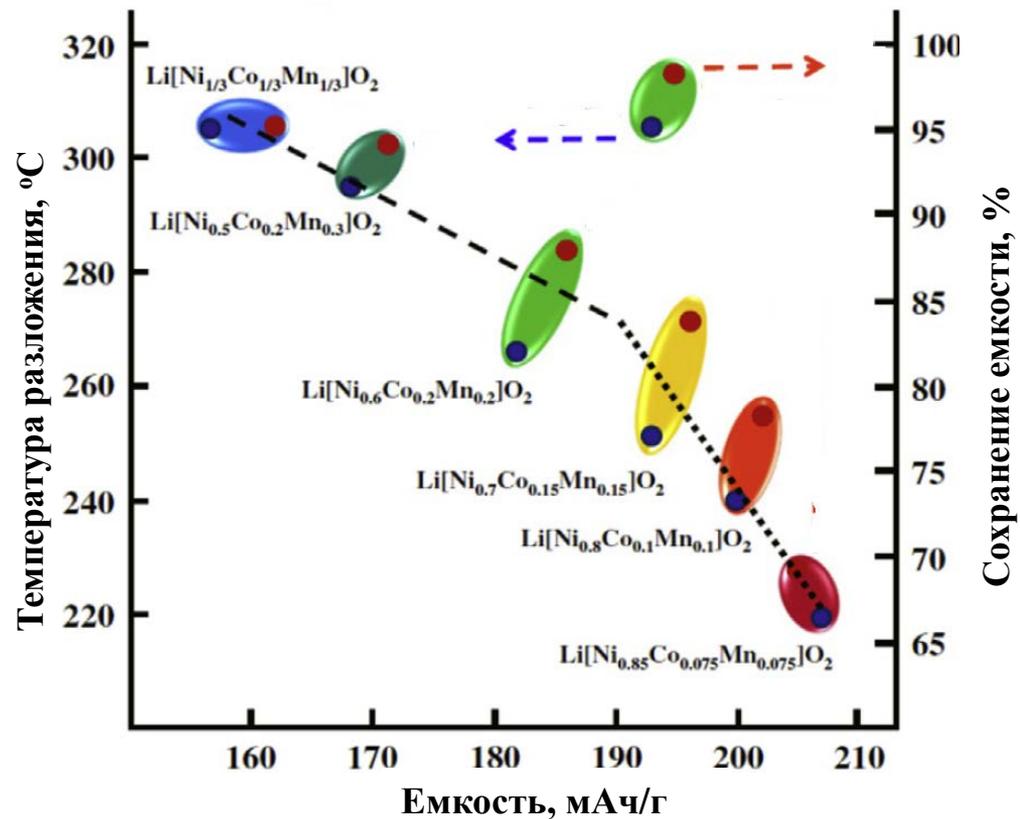
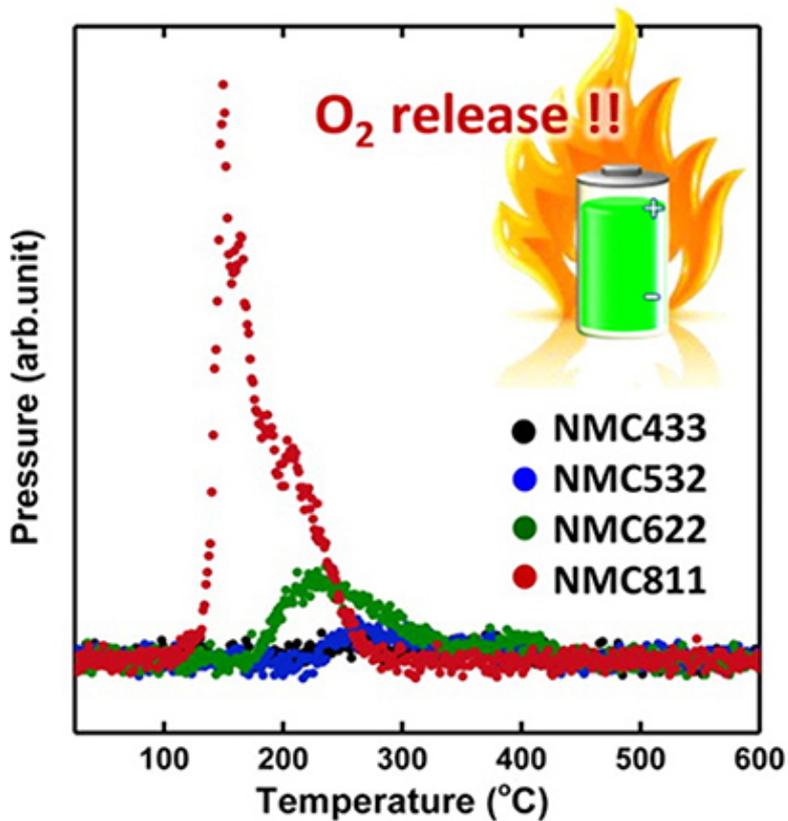
Катодные материалы на основе слоистых оксидов:

- **обогащенные Ni NMC (NMC611, NMC822 и с большим содержанием Ni)**
потенциал заряда до 4.3В отн. Li/Li⁺, разрядная емкость первого цикла >210 мАч/г, > 90% сохранения емкости после >100 циклов.
- **высоковольтный LiCoO₂**
потенциал заряда до 4.6В отн. Li/Li⁺, разрядная емкость первого цикла >215 мАч/г, > 80% сохранения емкости после >100 циклов.
- **обогащенные Li NMC (Li_{1.2}Ni_{0.13}Mn_{0.54}Co_{0.13}O₂ и пр.)**
потенциал заряда до 4.8В отн. Li/Li⁺, обратимая разрядная емкость >250 мАч/г, > 90% сохранения емкости после >300 циклов.

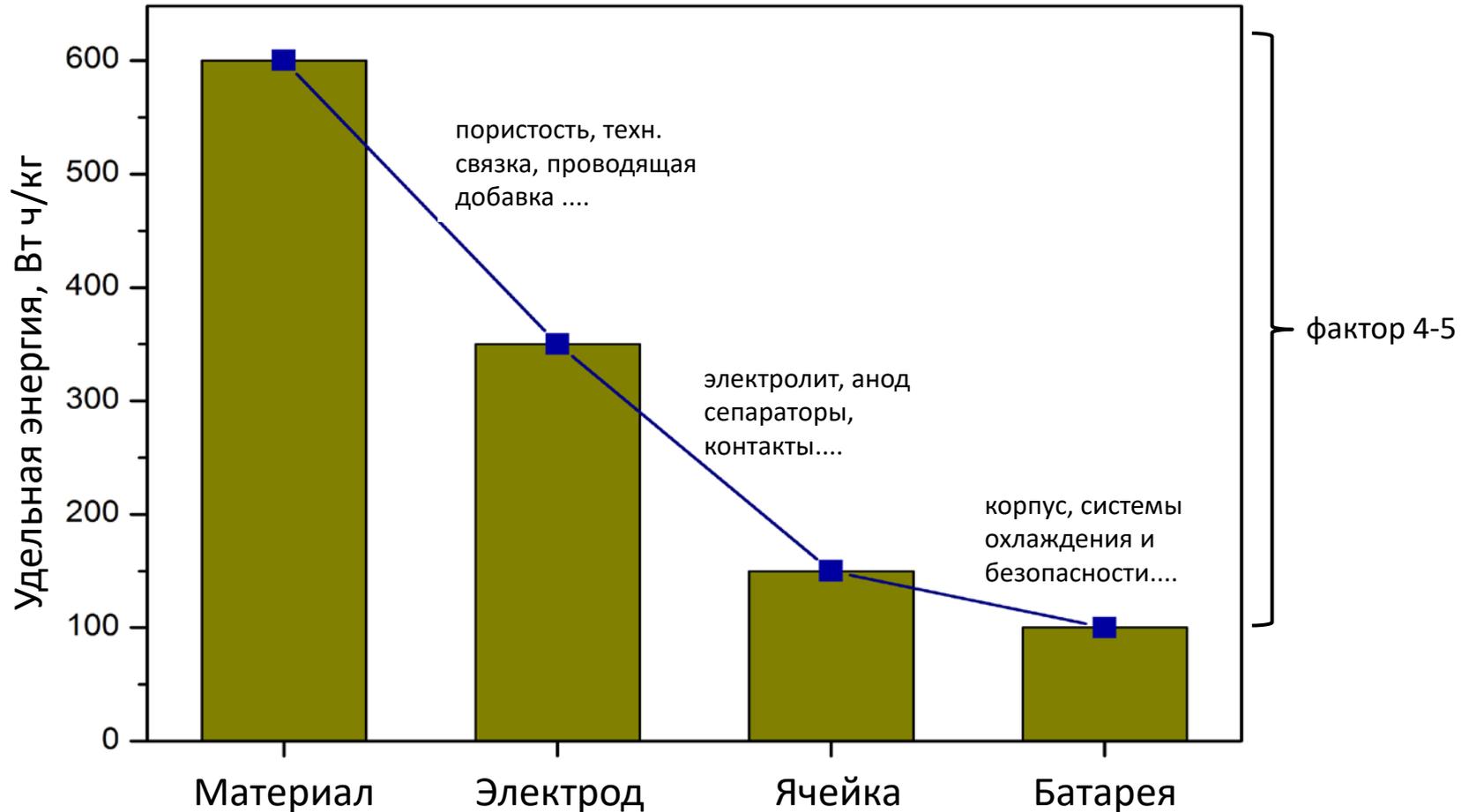
Катодные материалы на основе LiFePO₄:

- **обогащенный Mn и Co LiFePO₄**
потенциал заряда до 4.8В отн. Li/Li⁺, обратимая разрядная емкость 150 мАч/г, > 90% сохранения емкости после >500 циклов.

Безопасность



От материала катода до аккумуляторной батареи



Батарея с удельной энергией **200 Вт ч/кг** → катод с удельной энергией **800 – 1000 Вт ч/кг**

Пост-литиевые электрохимические системы

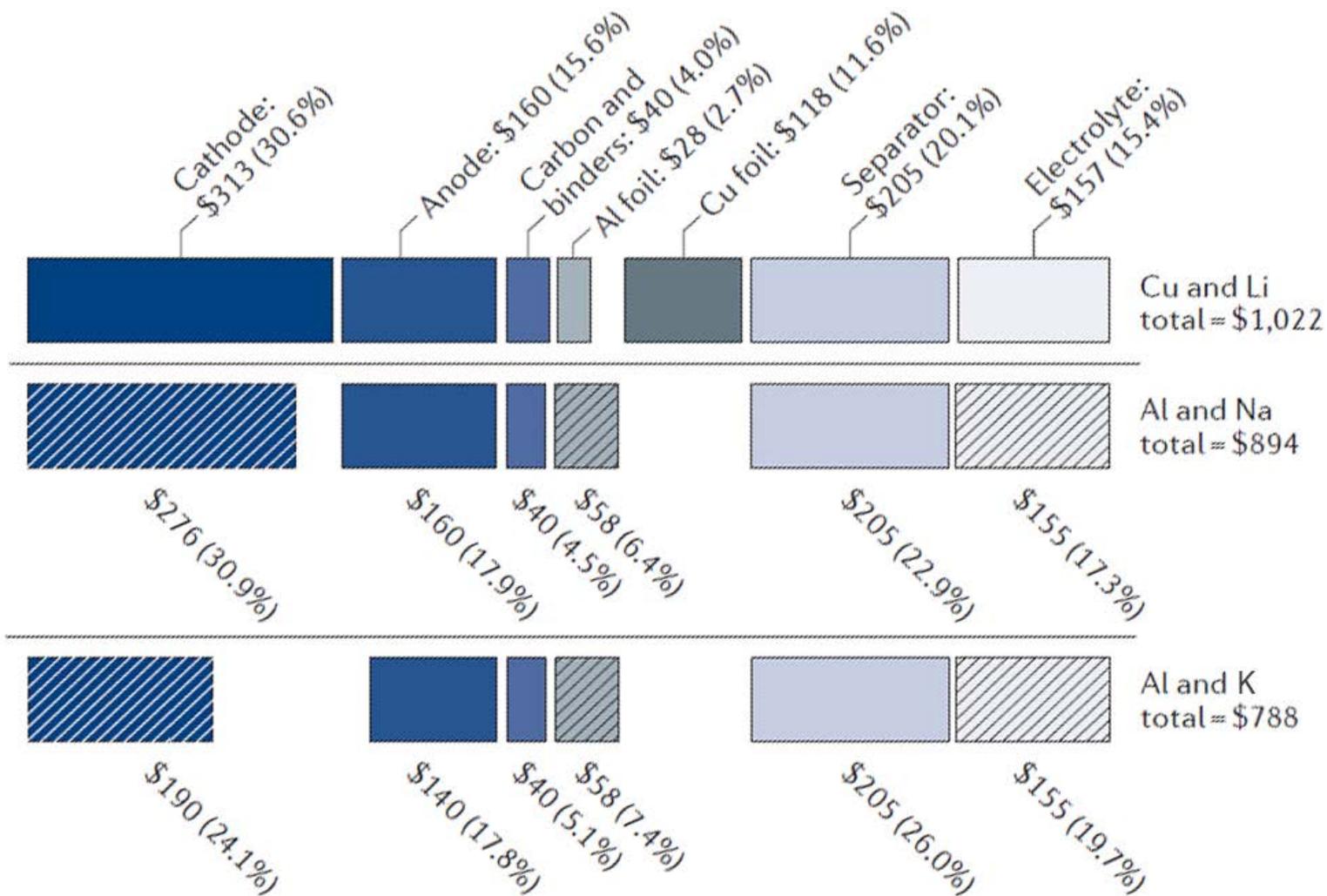
Характеристика	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺
Атомный вес, г/моль	6.94	22.99	39.10
$E^0(M^+_{PC}/M)$ относительно Li ⁺ _{PC} /Li, В	0	0.23	-0.09
Распространенность в земной коре, ppm	~20	28000	26000

Соединение	Литий	Натрий	Калий
Стоимость карбоната [US\$/тонна]	23000	200	1000
Стоимость X-PF ₆ [US\$/кг]	7755	2823	369

	Li-ион	Na-ион	K-ион
Катодный материал	LCO, LFP, NMC	Na ₃ V ₂ (PO ₄) ₃	K ₂ Mn[Fe(CN) ₆]
Емкость, мАч/г	140 – 170	110 - 120	100 - 110
Потенциал, В	3.5 – 3.9	3.3 – 3.7	3.5 – 4.0
Удельная энергия, Втч/кг	490 – 660	350 - 400	350 - 400
Анодный токосъемник	Cu	Al	Al

Вклад стоимости материалов в цену аккумулятора

Расчет для Li-ионной, Na-ионной и K-ионной батареи (7 кВт, 11 кВтч)

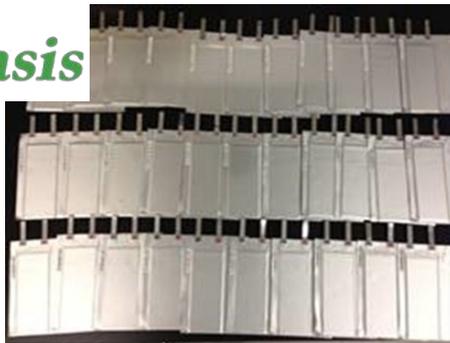


Пост-Li реальность



- слоистый катод $\text{Na}_x(\text{Mn,Fe,Ti,Mg})\text{O}_2/\text{HC}$
- 2 кВт прототип (февраль 2017)
- £2 млн. контракт на замену 12В свинец-кислотных автомобильных батарей (март 2018)

Novasis



- неоксидный катод (NMFC гексацианоферрат)/HC
- 5-20 Ач, 3.2В призматические ячейки (2018)
- \$3 млн. грант US DoE



- полианионный катод $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$
- 18650 прототип (2015)
- €3.6 млн. контракт на Na-ионную батарею (x10 раз быстрее, x10 срок службы за цену аналогичной Li батареи (октябрь 2018))

 Natron Energy

- гексацианоферратный катод/ гексацианоферратный катод
- инвестиции от Chevron Technology Ventures на создание стационарных энергохранилищ автомобильных зарядных станций (2019)
- Sharp Laboratories, Europe (2017): слоистый катод $\text{Na}(\text{Ni,Fe,Mn,Mg,Sn})\text{O}_2/\text{HC}$, прототип 4.2 Ач, 250 Втч/л;
- Sumitomo Ltd (2013): слоистый катод $\text{Na}(\text{Ni,Fe,Mn})\text{O}_2/\text{HC}$, прототип 0.6 Ач, ~2 Втч

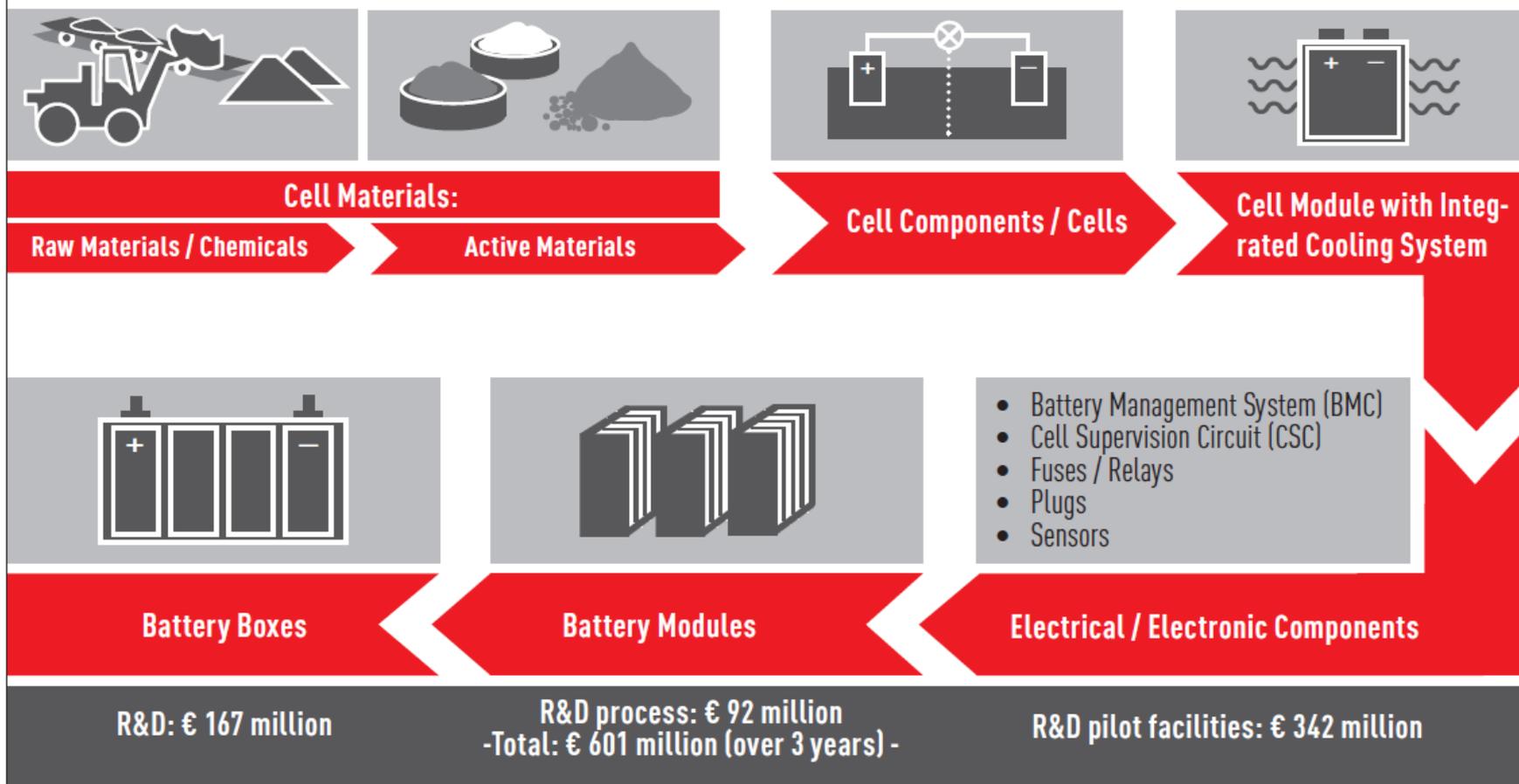
Опытно-промышленная технология Na-ионных батарей

Масштабирование синтеза катодного материала до 100 кг/год	2022 г.	40 млн. руб.
Масштабирование синтеза анодного материала до 100 кг/год	2023 г.	70 млн. руб.
Производство электролита	2023	60 млн. руб.
Разработка конструкции опытных ячеек 10-20 Ач	2023 г.	50 млн. руб.
Исследование безопасности	2024 г.	120 млн. руб.
Создание систем управления батарей	2024 г.	90 млн. руб.
Создание прототипного модуля 10-20 кВтч	2025 г.	150 млн. руб.
	5 лет	580 млн. руб.

Поддержка развития индустрии электротранспорта

Electromobility in Germany: Vision 2020 and Beyond

Key Components of the Value Chain



Поддержка развития индустрии электротранспорта

США: \$2.4 млрд. грантовой поддержки на разработку батарей и нового поколения электромобилей (2009)

<https://energy.gov/articles/president-obama-announces-24-billion-grants-accelerate-manufacturing-and-deployment-next>

Евросоюз: \$43 млрд. государственных и частных инвестиций в индустрию электродвижения с прогнозируемым ростом до \$225 млрд. (2017)

http://europa.eu/rapid/press-release_MEX-17-2124_en.htm?flocale%3den

Китай: \$15 млрд. инвестиций в индустрию электродвижения + \$29 млрд. в создание сети зарядных станций к 2020 г.

<http://users%20.cla.umn.edu/~erm/data/sr486%20/newsp%20aper/wsj09%201610.pdf>

Спасибо за внимание!