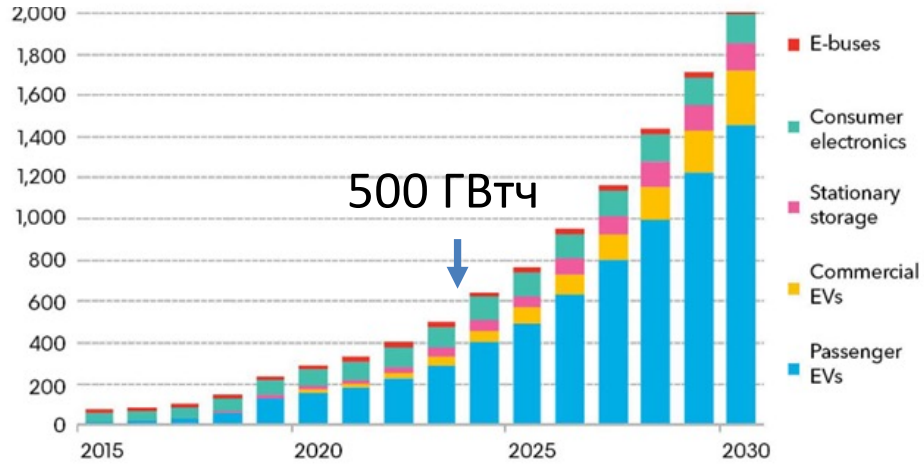
Металл-ионные аккумуляторы в сетевых системах накопления энергии

Е. В. Антипов

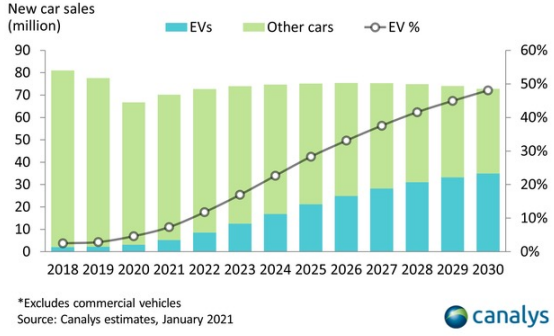
Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
Сколковский институт науки и технологий

Структура и динамика мирового рынка литий-ионных батарей

ГВтч **Прогноз производства аккумуляторов**



Реальное производство аккумуляторов (2023 г.) - 900 ГВтч (> 100 млрд. $)

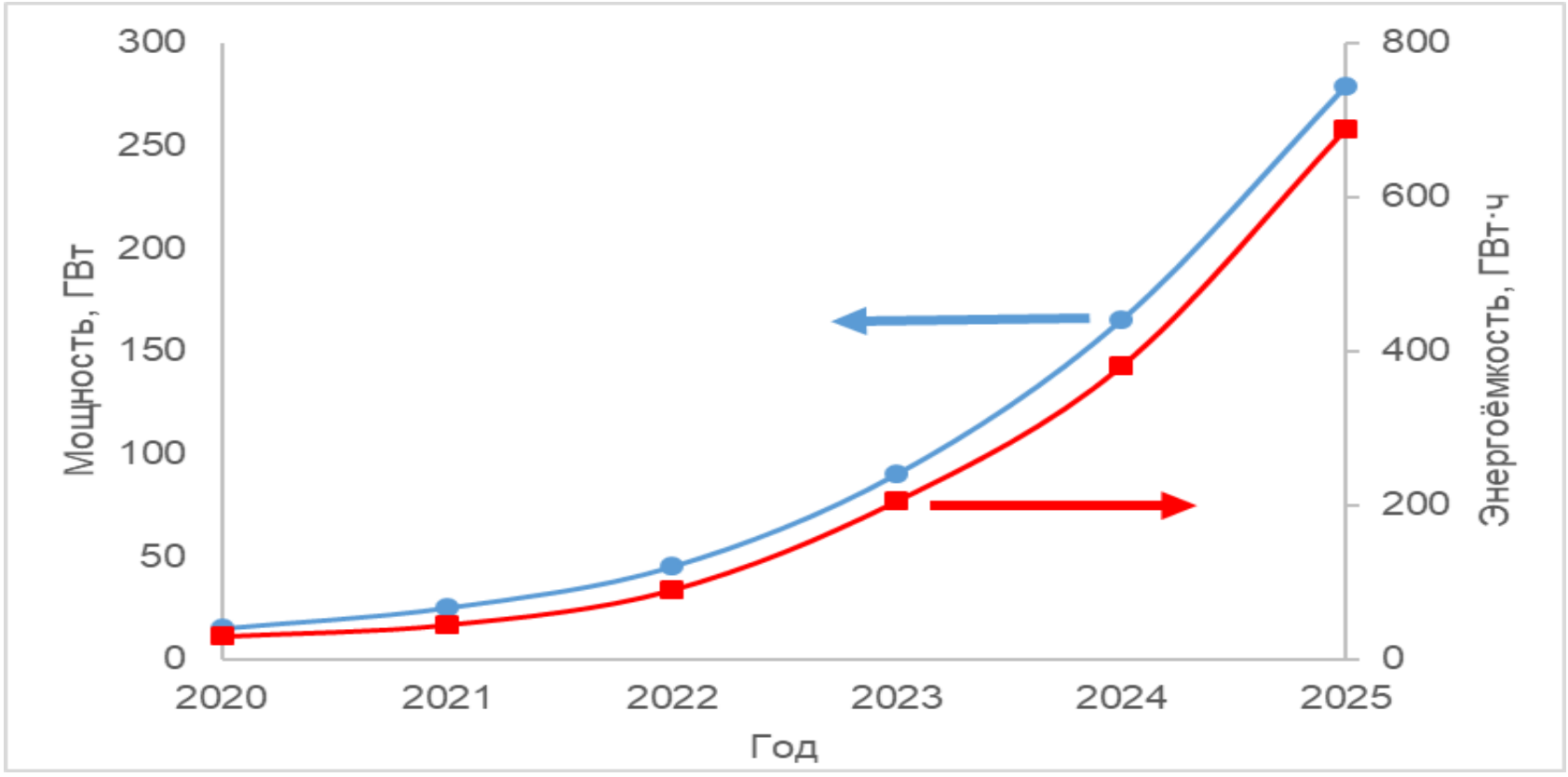


Прогноз производства авто/электромобилей

Страна	2030 (ГВтч)
Китай	6,268
США	1,261
Германия	262
Венгрия	210
Канада	204
Франция	162
Ю. Корея	94
Великобритания	67

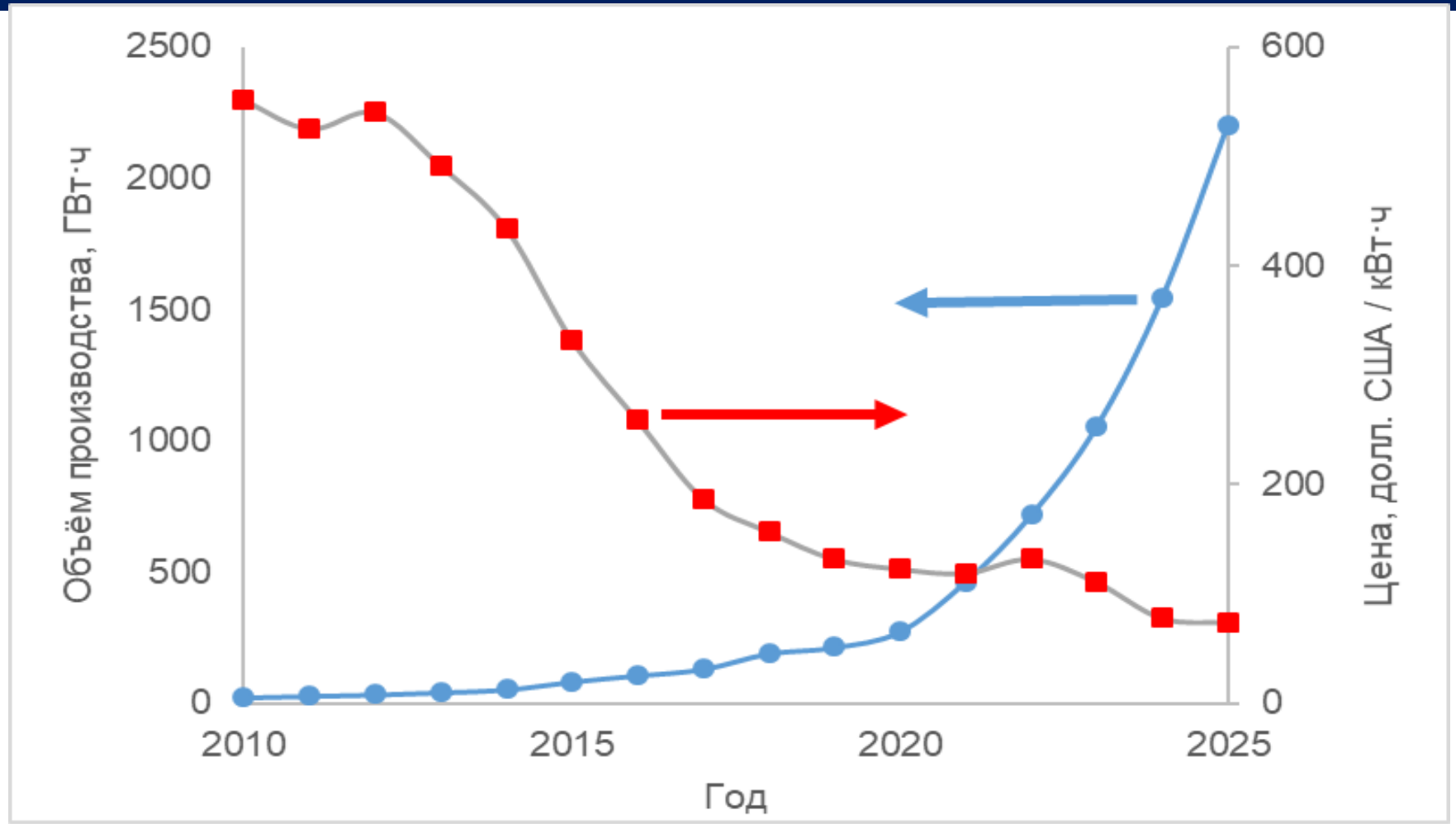
Рынок 500-800 млрд. $

Объем мощности и энергоёмкости аккумуляторных СНЭЭ в мире по годам (нарастающим итогом)



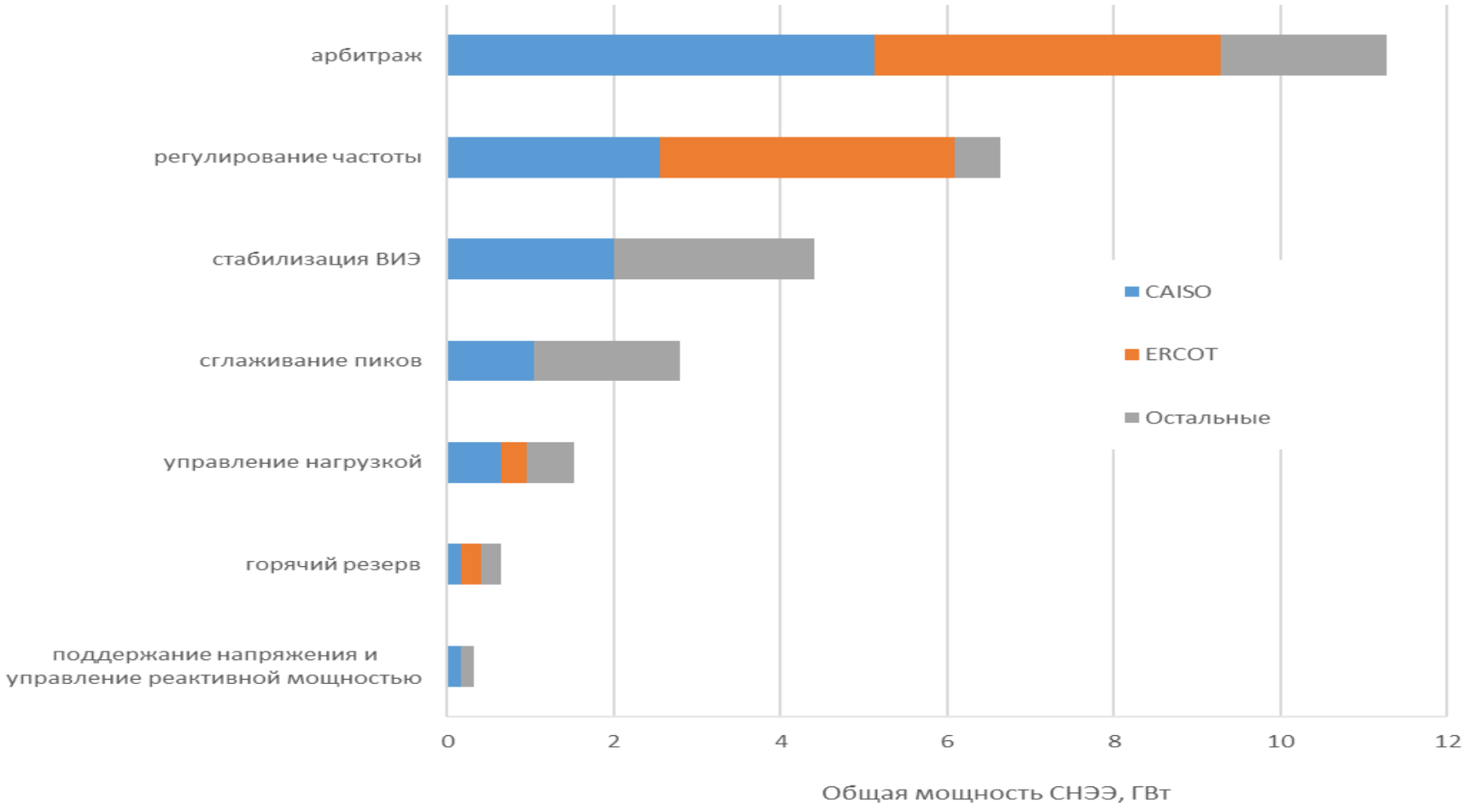
По данным https://rreda.ru/products/yearly-reviews/review-53516

Изменение годовых объёмов производства ЛИА в мире и мировых цен на ячейки ЛИА в 2010-2025 годах



По данным BloombergNEF https://ourworldindata.org/

Мощности СНЭЭ для различных сетевых сервисов в США



По данным https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=66164

Фабрики литий-ионных аккумуляторов в РФ

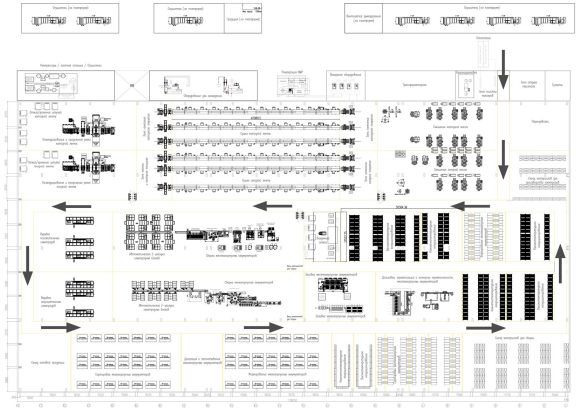
15 декабря 2025 г. – запуск Гигафабрики Росатома (4 ГВтч/год)







В 2026/2027 гг. – запуск Гигафабрики Росатома (4 ГВтч/год) в Красной Пахре
и Металиона (до 1 ГВтч/год) в Долгопрудном



В 2025 г. запущен завод «Батареон» в Татарстане (0.1 ГВТч и в 1 ГВТч в 2030 году)





В 2025 г. запущен завод «ИНЭСИС» в Тольятти (20 МВтч)
2026/2027 гг. запуск Гигафабрики «ИНЭСИС» (4 ГВтч/год) в Красной Пахре

В 2027 году мощности производства ЛИА – 13 ГВтч = 200 тысяч электромобилей

Перечень поручений президента РФ по итогам совещания по вопросам развития систем накопления электрической энергии (6 октября 2026 г.)

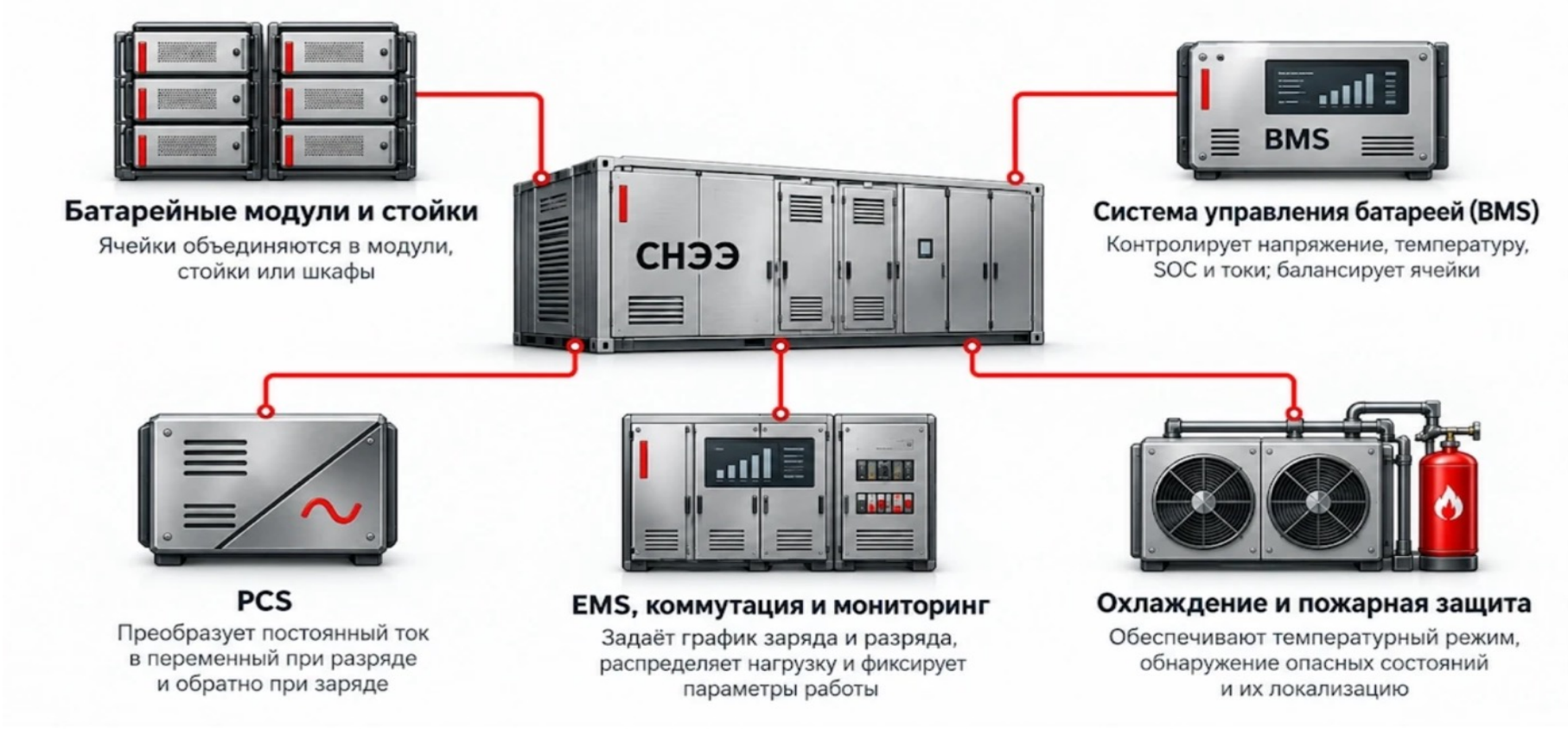
1. Правительству Российской Федерации разработать при участии исполнительных органов субъектов Российской Федерации и заинтересованных организаций и утвердить комплексную программу развития систем накопления электрической энергии в Российской Федерации на период до 2042 года, предусмотрев:

г) расширение использования систем накопления электрической энергии (в первую очередь российского производства) в электроснабжении потребителей,

участие проектов, предусматривающих использование систем накопления электрической энергии, в технологически нейтральных отборах проектов строительства генерирующих мощностей в целях удовлетворения перспективного спроса на электрическую энергию и мощность;

стимулирование потребителей к созданию систем накопления электрической энергии в целях повышения надежности электроснабжения и снижения совокупных затрат на электроснабжение;

Функциональная структура сетевой системы накопления электроэнергии



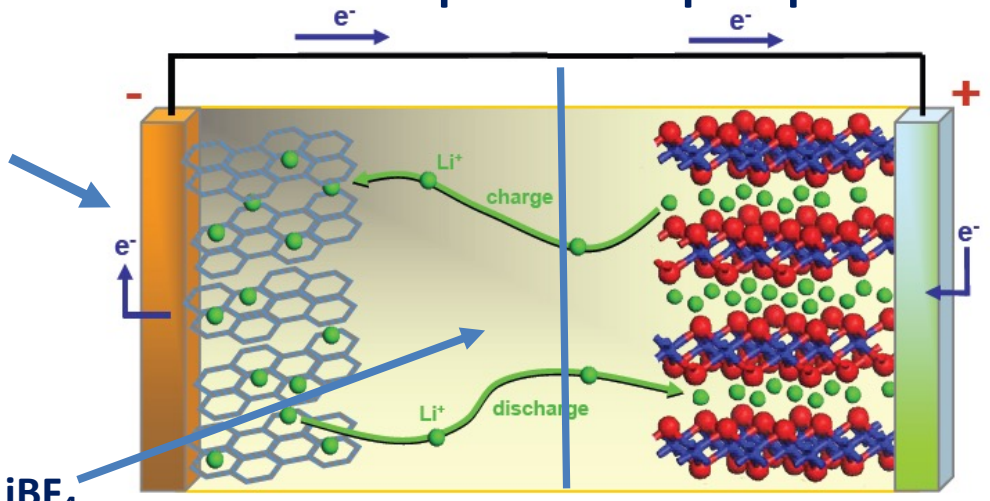
https://www.powerunit.ru/about-company/company-blog/sistemy-nakopleniya-energii/

Литий-ионный аккумулятор: основные материалы

Полимерный сепаратор

Анодный материал (графит) на медной фольге

Полимерные связующие



Катодный материал (оксид, фосфат) на алюминиевой фольге

Полимерные связующие ПВДФ или водорастворимые: полисахариды, латексы, проводящие полимеры и др.

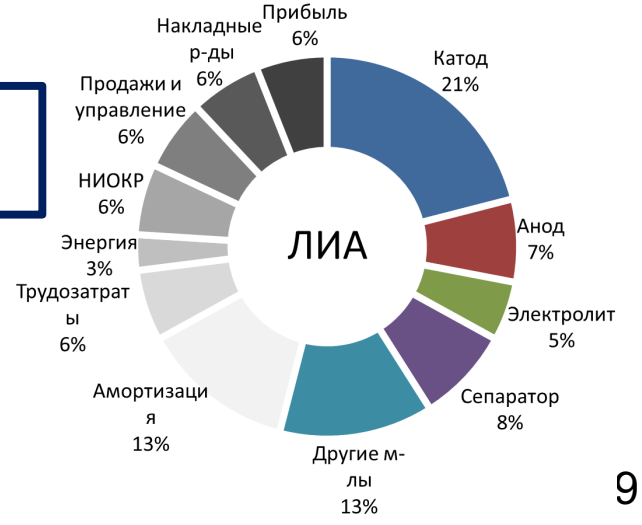
Электролит - соли: $LiPF_6$, $LiBF_4$
растворители: EC, PC, DMC, DEC

Органические добавки в электролиты
Корпусирование

Li_xC_6 графит **Li^+- проводящий электролит** **$LiMO_2$**

$$C_6 + LiCoO_2 \underset{\text{разряд}}{\overset{\text{заряд}}{\rightleftharpoons}} Li_xC_6 + Li_{1-x}CoO_2$$

Доля материалов в стоимости ЛИА при серийном производстве более 50%.

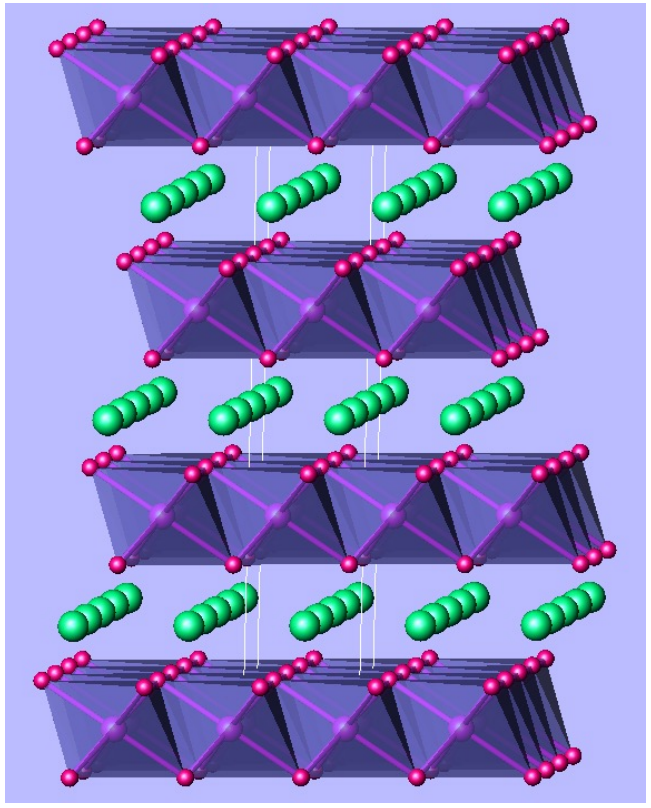


Сравнительные технические характеристики аккумуляторов, использующихся в СНЭ

Краткое обозначение	Система (катод/анод)	Номинальное напряжение, В	Удельная энерго-ёмкость, Втч/кг	Макс. скорости заряда/разряда	Прибл. ресурс, циклы	Диапазон рабочих температур	Цена (ячейка), доллары США за кВтч (2025)*
ЛИА NMC	NMC/графит NMC/Si-графит	3.6-3.7	150-300	3C (ячейки высокой ёмкости) 10C (ячейки высокой мощности)	1000-3000	-20…+60 °C (разряд) 0…+50°C (заряд)	100-120
ЛИА LFP (железо-фосфат)	LFP/графит	3.2-3.3	100-180	10C	1000-10000		36-50
НИА	NFM/(твёрдый углерод)	3.0-3.1	100-140	10C	2000-10000	-40…+60 °C (разряд) 0…+50°C (заряд)	50-100

* крупнооптовые поставки

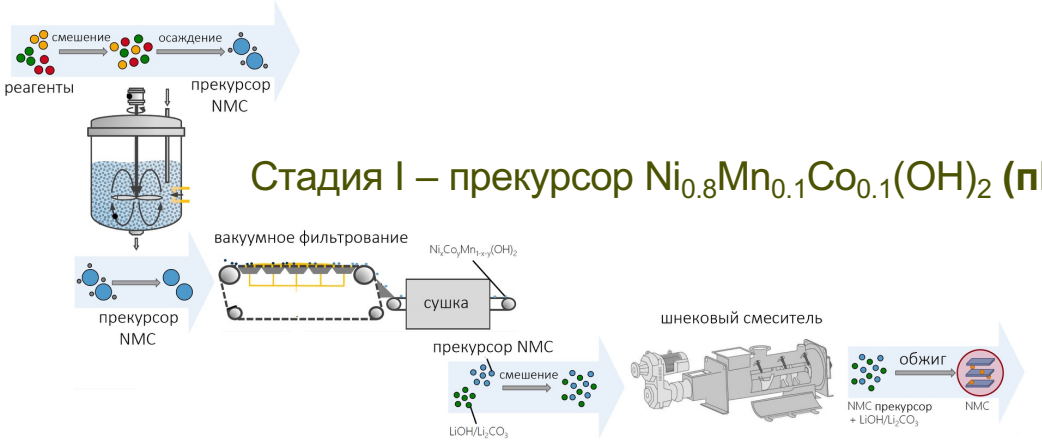
Поколения слоистых катодных материалов



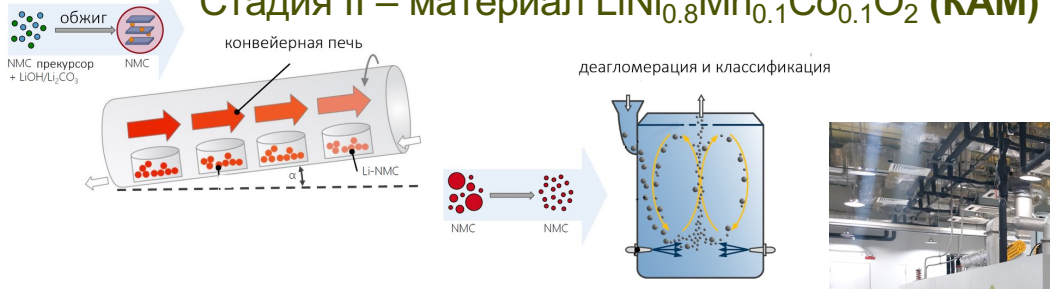
Поколение	Материал	Емкость, мАч/г
#1	$LiCoO_2$ (LCO)	140
#2	$LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$ (NMC111) $LiNi_{0.5}Mn_{0.3}Co_{0.2}O_2$ (NMC532) $LiNi_{0.84}Co_{0.12}Al_{0.04}O_2$ (NCA)	160-180
#3	$LiNi_{0.6}Mn_{0.2}Co_{0.2}O_2$ (NMC622) $LiNi_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1}O_2$ (NMC811)	180-220
#4	высоковольтный LCO $LiNi_{0.95}Mn_{0.025}Co_{0.025}O_2$ (NMC952525)	240-250
#5	монокристаллические NMC622, NMC811, NMC952525	170-220
#6	$Li_{1.2}Ni_{0.13}Mn_{0.54}Co_{0.13}O_2$ (Li-rich NMC)	270-300

Технология производства NMC (Сколтех и ООО «Рустор»)

Производство слоистых катодных материалов NMC



Стадия I – прекурсор $Ni_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1}(OH)_2$ **(пКАМ)**



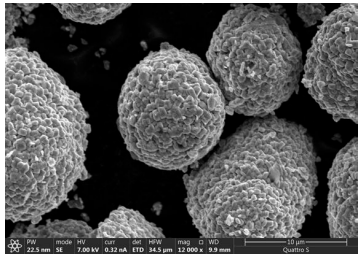
Стадия II – материал $LiNi_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1}O_2$ **(КАМ)**



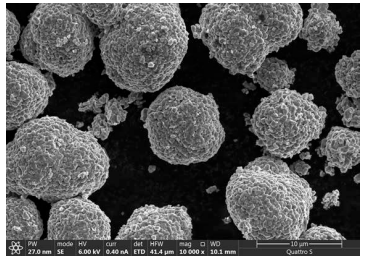




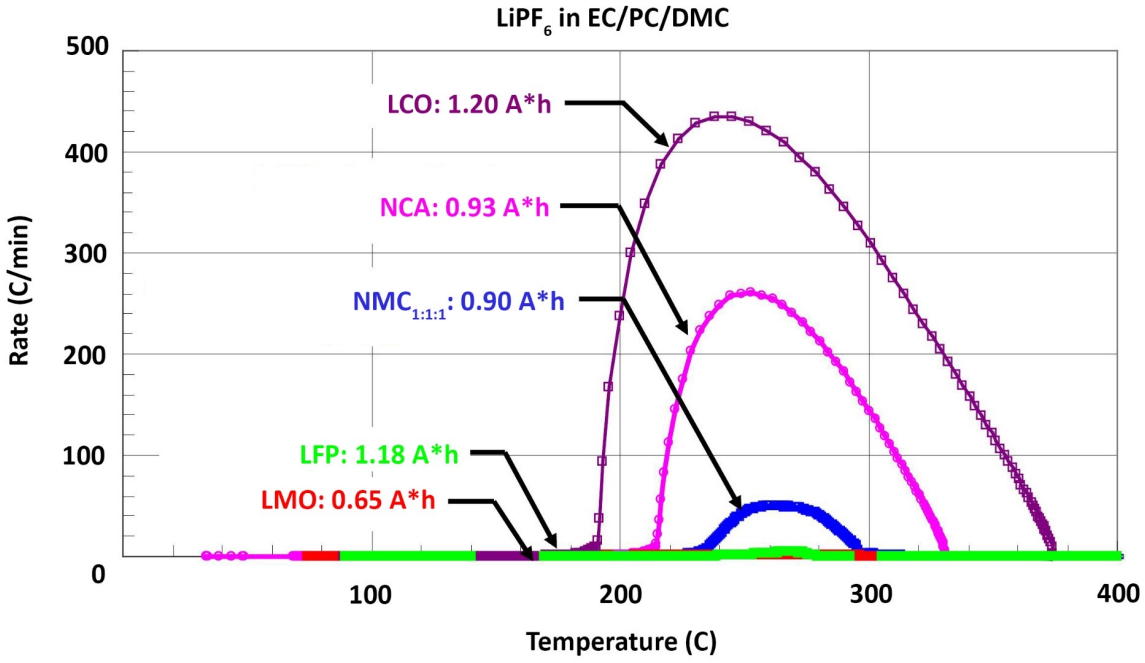
NMC622



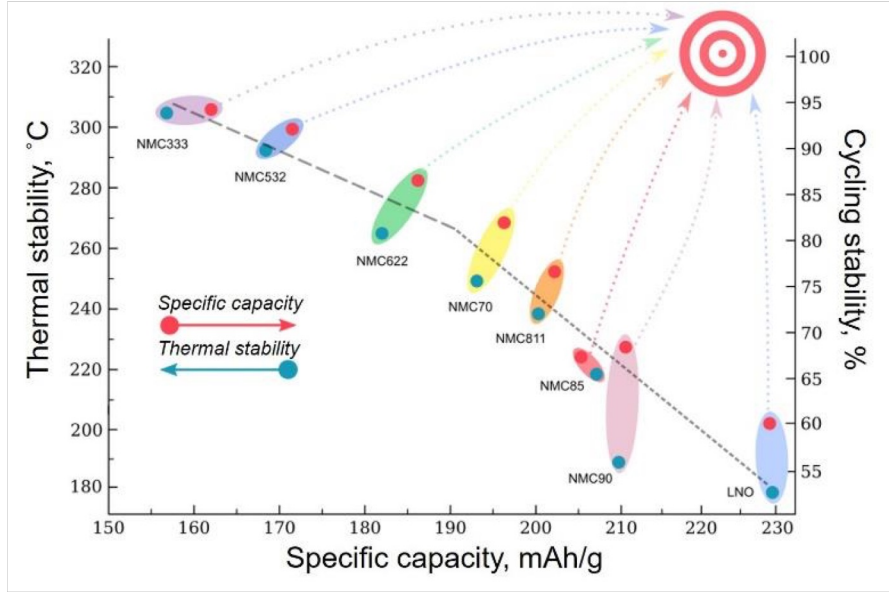
NMC811+



Взрывоопасность различных катодных материалов

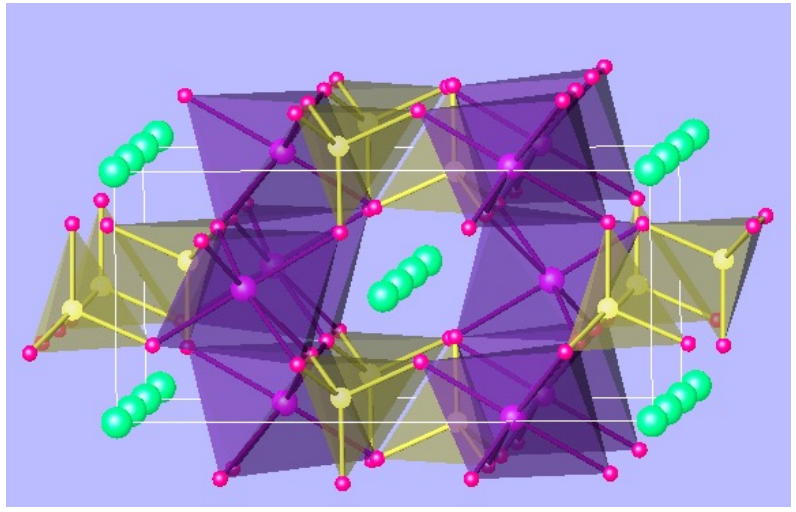


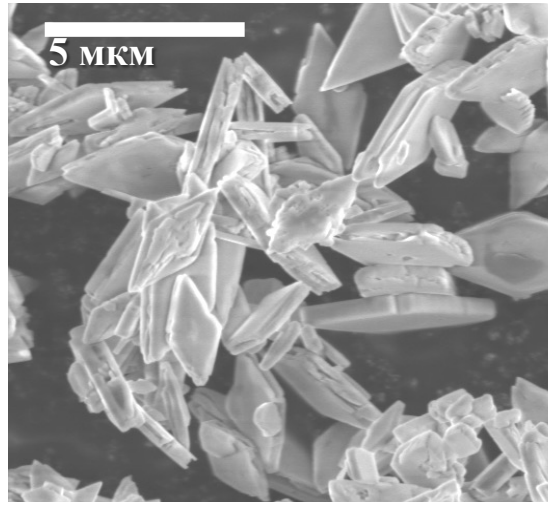
Скорость саморазогрева аккумуляторов 18650 с различными катодными материалами

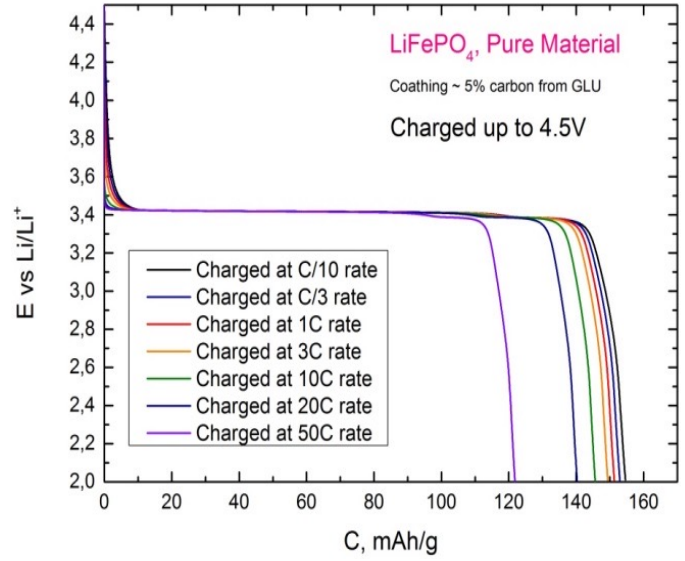


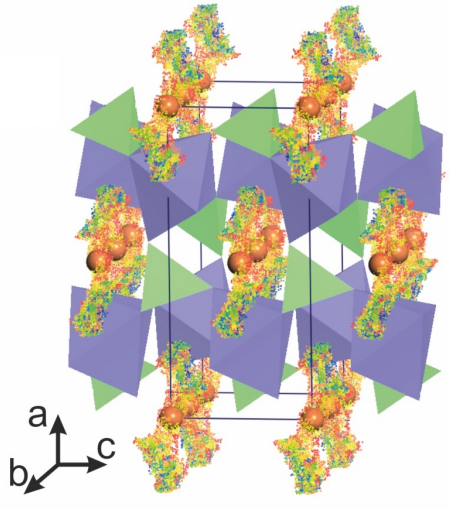
Удельная емкость, термическая устойчивость и циклируемость различных катодных материалов NMC

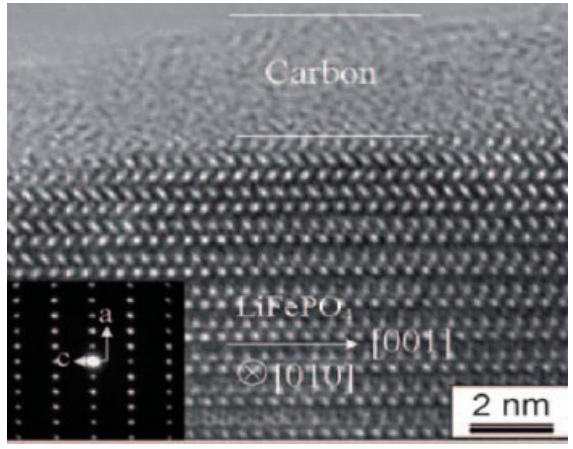
Безопасный катодный материал $LiFePO_4$

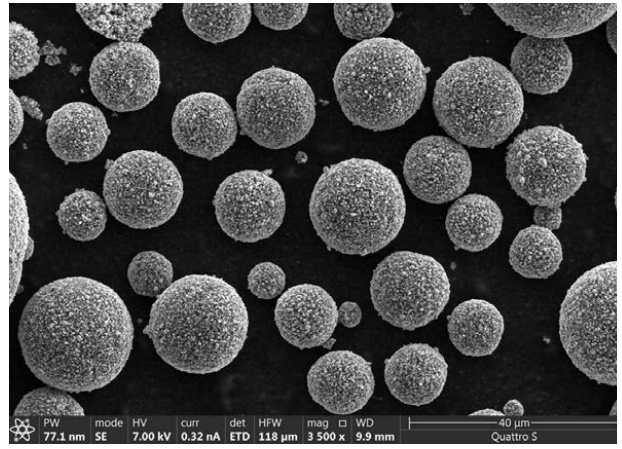










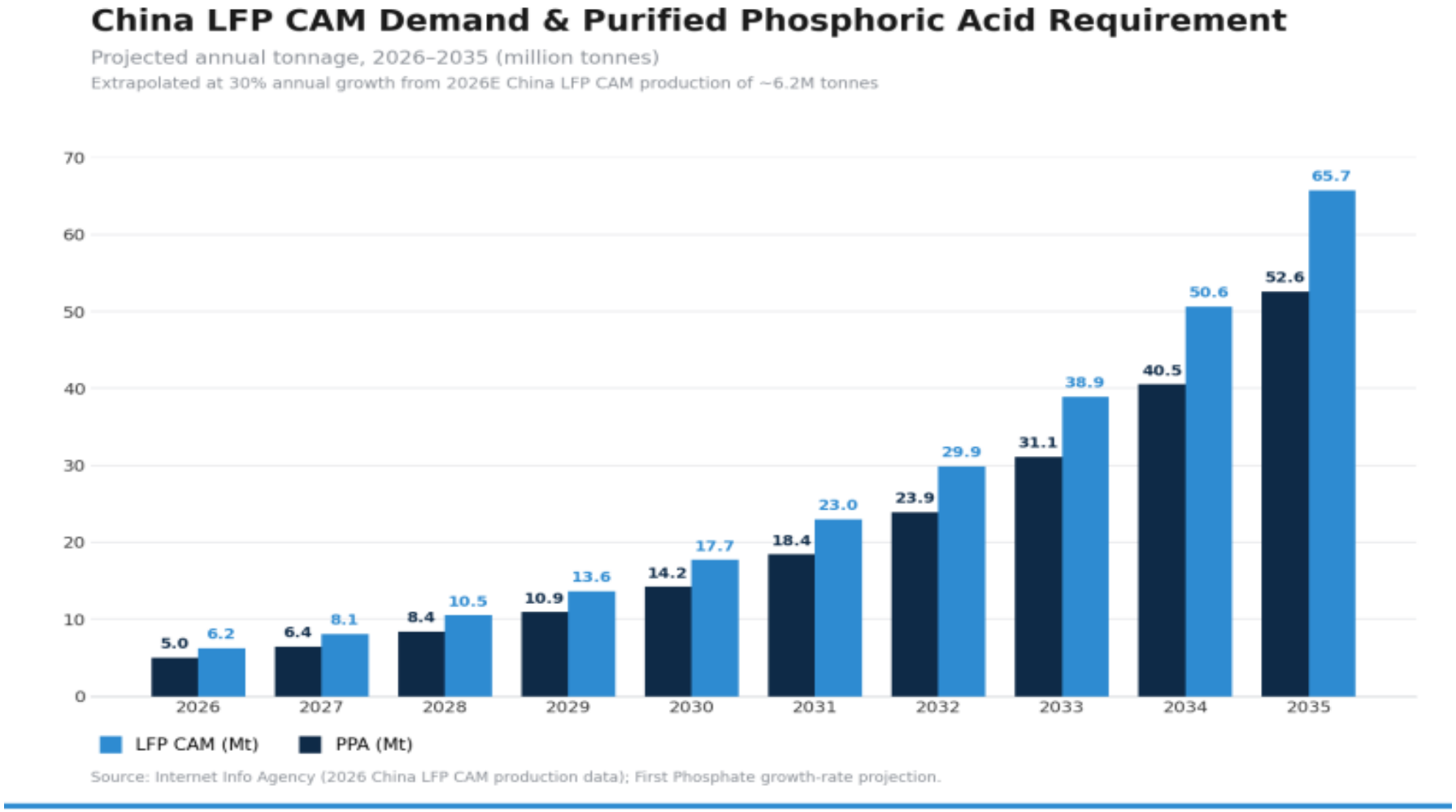


ПРОГРЕСС В ЛИА С LFP **КАТОДАМИ**

- Повышение удельной энергоёмкости ЛИА LFP приводит к снижению их цены за кВт·ч
- В 2025 ЛИАБ LFP были на 40% дешевле ЛИАБ NMC
- Ресурс по циклированию ЛИА LFP в 3 - 4 раза выше, чем у ЛИА NMC
- ЛИА LFP постепенно вытесняют ЛИА NMC не только в стационарных применениях, но и в батареях электротранспорта

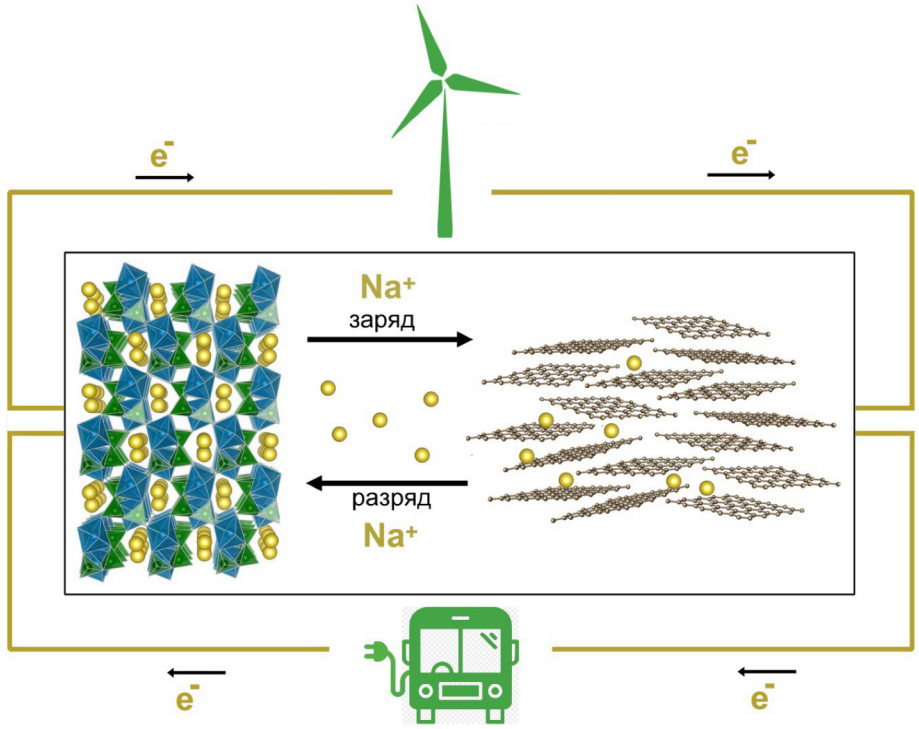
- Во всём мире в 2025 доля ЛИА LFP в электромобилях составила 55% (в 2024 - 50%)
- В Китае доля электромобилей с ЛИАБ LFP растёт и превысила 80% в 2025 году
- В США LG Energy Solution переориентирует 5 из 7 заводов с производства ЛИА NMC на ЛИА LFP
- В Европе Stellantis начинает использование ЛИА LFP наряду с ЛИА NMC, чтобы снизить стоимость электромобилей в массовом сегменте

Прогноз объёмов спроса на LFP в Китае и соответствующие объёмы очищенной ортофосфорной кислоты



https://firstphosphate.com/lfp-battery-demand-china-high-purity-phosphate/

Схема натрий-ионного аккумулятора



ELECTROCHEMICAL INTERCALATION OF SODIUM IN Na_xCoO_2 BRONZES

Claude DELMAS, Jean-Jacques BRACONNIER, Claude FOUASSIER
and Paul HAGENMULLER

Laboratoire de Chimie du Solide du C.N.R.S., Université de Bordeaux I, 33405 Talence Cedex, France

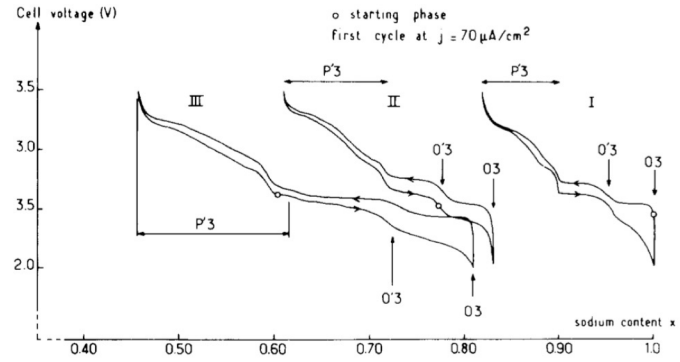


Fig. 4. Electrochemical behavior of Na_xCoO_2 phases with P'3, O'3 and O3 packings.

Solid State Ionics 3/4 (1981) 165–169
North-Holland Publishing Company

Принцип работы аналогичен литий-ионным, за исключением замены графитового анода на анод из т.н. «твердого углерода»

Натрий-ионные аккумуляторы

Li-ion: 200-300 $/КВт*ч
Pb-acid: 100-200 $/КВт*ч
Na-ion аккумуляторы (100-200 $/КВт*ч) заменят в будущем свинец-кислотные аккумуляторы и часть литий-ионных

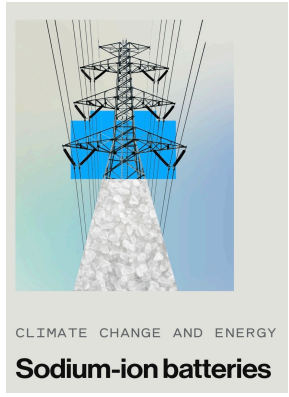
Li-ion
Li в земной коре:
21 г/т



Na-ion
Na в земной коре:
25 кг/т

Na вместо Li	→	Снижение цены и зависимости от поставщиков сырья
Возможность использовать Al фольгу на аноде	→	Снижение цены; хранение и транспортировка при 0 В.
Интеркаляционный механизм запасания энергии	→	Циклический ресурс выше, чем у Pb-acid
Отсутствие в составе Pb, Co, Cd и т.д.	→	Одни из наиболее экологически чистых типов аккумуляторов






100 MWh Na-ion battery energy storage power station
Qianjiang, Hubei

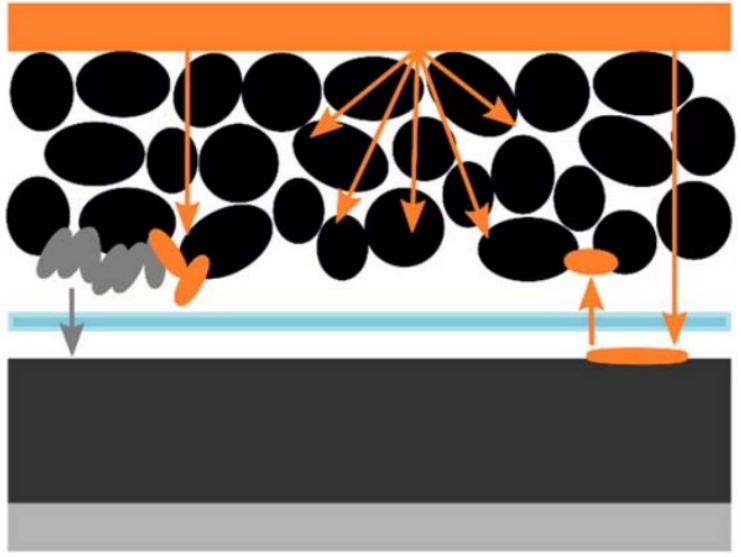
В КНР уже выпускаются НИА более 10 ГВтч/год

Преимущества натрий-ионных аккумуляторов

- ✓ Ценовые преимущества и доступность сырьевой базы;
- ✓ Технология может быть **оптимизирована под существующие мощности** индустрии ЛИА

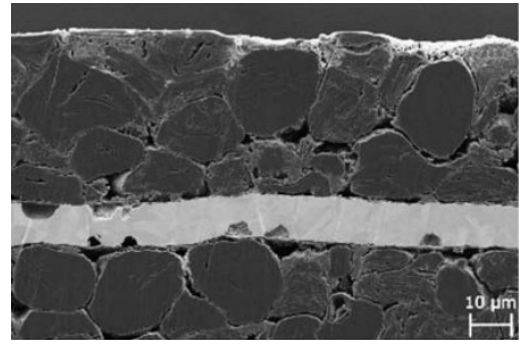
- ✓ **Повышенная безопасность** НИА:
  - толерантность к глубокому и полному разряду («ноль вольт»);
  - толерантность к внешнему короткому замыканию;
  - хранение в разряженном состоянии без потери ТТХ;
- ✓ Более эффективная и устойчивая **работа при низких температурах**

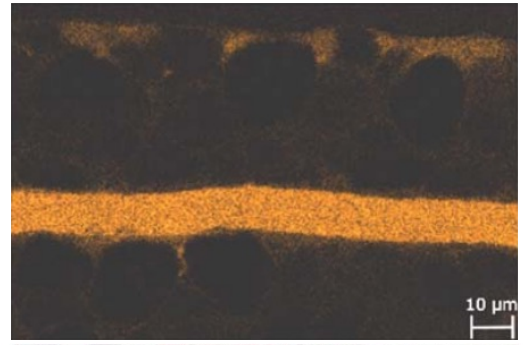
Медная фольга как источник проблем

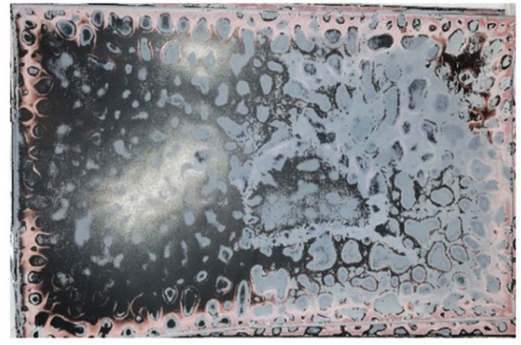


Окисление и растворение меди
↓
Потеря контакта и разрушение токосъемника

Загрязнение компонентов остатками меди или её отложениями
↓
Увеличение импеданса и необратимая потеря емкости







Повторяющиеся процессы отложения меди
↓
Образование проводящих медных мостиков через сепаратор
↓
Внутреннее короткое замыкание

10.1038/srep30248 10.1038/s41598-021-85575-x 10.1149/1945-7111/abdc5f

Низкотемпературные приложения

1. Радиус Стокса (Å) Li^+ 3.40-3.82 Na^+ 2.76-3.05

- Меньшая **энергия десольватации**
- Более быстрая **диффузия** Na^+ **в жидкости**

2. Энергия связи M–O (кДж/моль) Li–O ~340-380 Na–O 220-260

- Более быстрая диффузия Na^+ **в твердом теле** (в среднем)

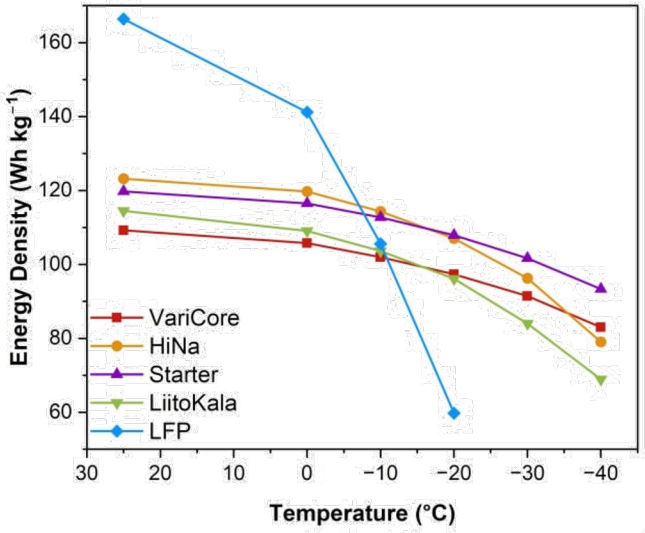
3. Другие типы активных материалов

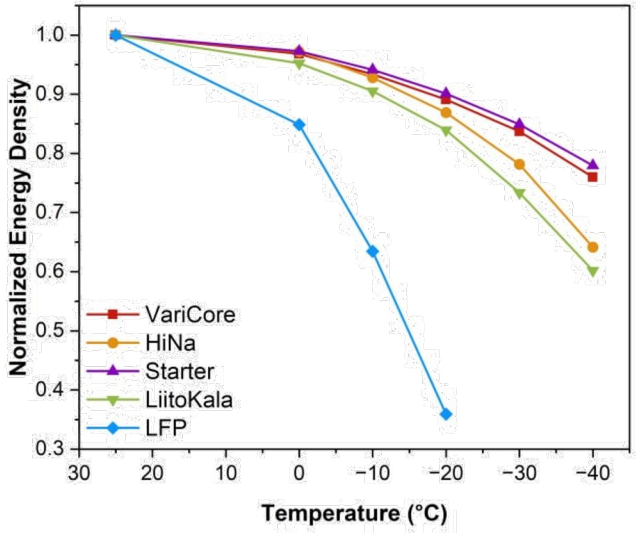
Альтернативные возможности по дизайну электролитов

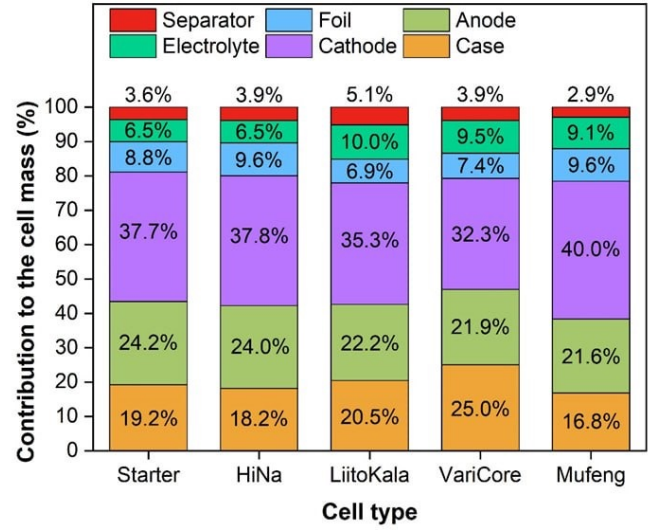


https://doi.org/10.1002/tcr.201700057

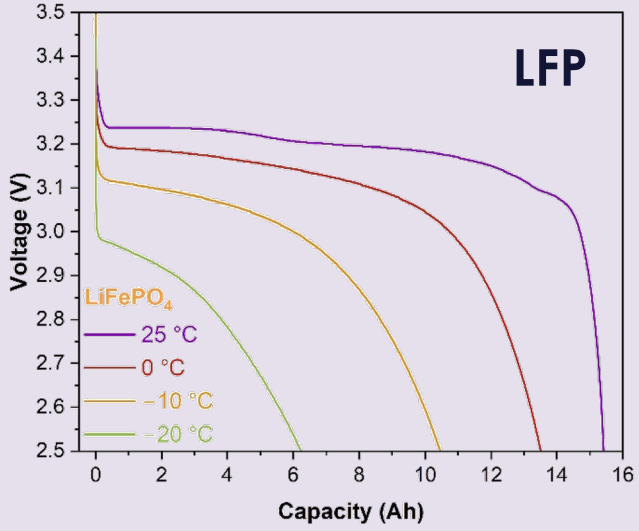
Низкотемпературные приложения

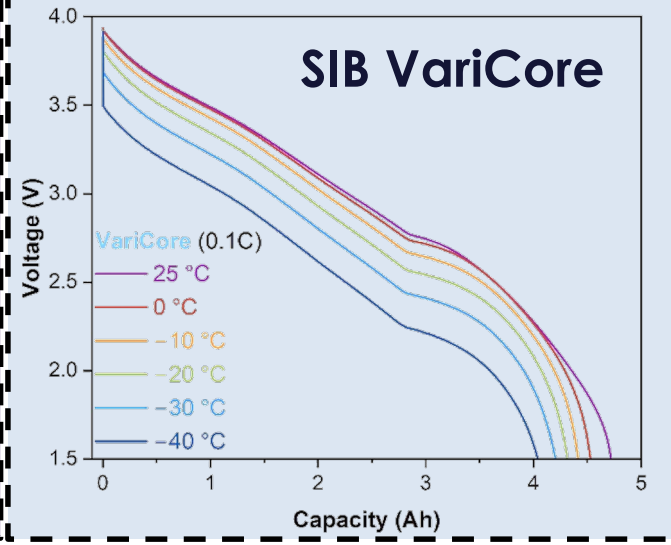
















Натрий-ионные накопители в электроэнергетике

Сетевые задачи, действующие проекты и масштабирование до 2030 года

СН(Э)Э – система накопления (электро)энергии

108 ГВтч
ввод СНЭ в 2025
+40% за год [1]

~580-1000 ГВт
прогноз к 2030 году в зависимости от сценария IEA [2]

Применения в электросетях:

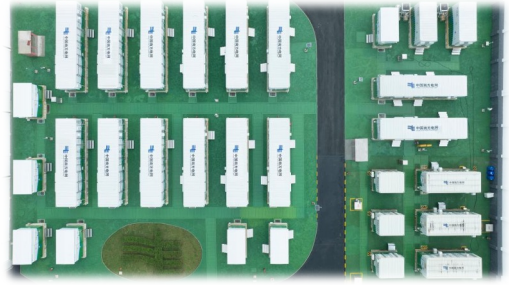
- Возобновляемые источники энергии (ВИЭ);
- Сглаживание графика нагрузки-потребления;
- Устойчивость и бесперебойная сетей (ИБП);
- Резервные мощности;
- «Умные сети» и виртуальные электростанции

Преимущества НИА:

- **Li** → **Na** = нет ценовых колебаний и шоков
- **Работа СНЭ в холодном климате** преимущество относительно LFP [3]
- **Потенциал снижения цены СНЭ** за счет сырья, терморегулирования и более простых BMS (СКУ)
- **Повышенная безопасность СНЭ** глубокий/полный разряд без потери ТТХ



Datang, Китай [4]
50 МВт / 100 МВтч
в эксплуатации с 2024



Fulin, Китай [5]
50 МВтч
расширение в 2025

> 300 МВтч
установленной емкости СНЭ НИА в 2026

> 70 ГВтч
соглашений о НИА (все применения [6])

27% CAGR
рынок НИА, все применения 2025-2033, IDTechEx прогноз 2023 [7]

2026-2030: НИА выходят на серийное сетевое хранение

Приоритет для России: регионы с холодным климатом, интеграция ВИЭ и снижение сырьевой зависимости

[1] IEA, 2026 [2] IEA, 2024 [3] IEA, 2026 [4] HiNa, 2024 [5] Xinhua, 2025 [6] Wood Mackenzie [7] IDTechEx, 2023

Проект РНФ памяти Е. П. Велихова

Научно-технологические основы НИА: **активные материалы катода/анода, электролит, ячейка**

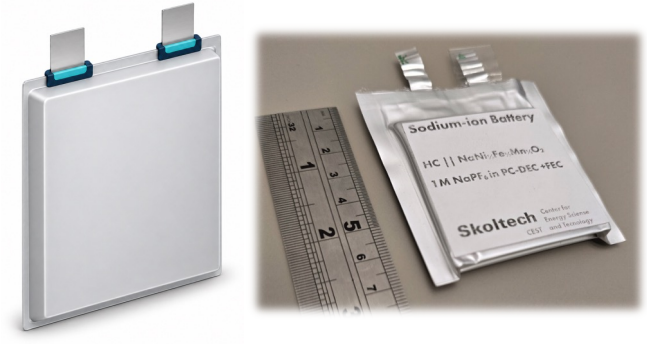
Цель проекта – разработка технологии получения катодных и анодных материалов, электролитов и сборки ячеек НИА (от 15 Втч, от 130 Втч/кг)



Электролит

Электроды НИА





Универсальная призматическая ячейка НИА в мягком корпусе

НИР (УГТ 3→5) | **ОКР (УГТ 5→7)** | **Производство (УГТ 7→9)**

2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030-2032

2-й этап (январь 2026-декабрь 2026):

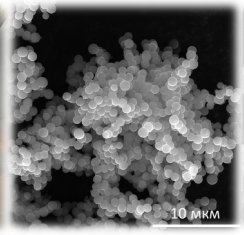
- Масштабирование активных электродных материалов до **50-100 кг/год**;
- Предварительная концепция продукта + ТЭО;
- Сборка ячеек **50×50 от 1 Ач**
- Негорючий низкотемпературный электролит;
- Проектная работа с КНЦ СО РАН и МГУ имени М. В. Ломоносова.

3-й этап (январь 2027-декабрь 2027):

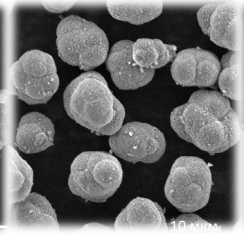
- Масштабирование активных материалов от **1 т/год**;
- Сборка полноформатных ячеек **100×100 от 5 Ач**
- Тестирование низкотемпературных свойств полноформатных ячеек
- Безопасность (негорючесть и полный разряд)
- Оптимизация формировки ячейки и параметров неактивных компонентов



Негорючий электролит



СЭМ: анод ХК



СЭМ: прекурсор NFM



Партии катодных материалов



Ячейка НИА 50×50 в мягком корпусе

Благодарности



Химический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова



Сколтех

А.И. Недолужкко, Е.Н. Грязиной и С.С. Федотову

Спасибо за внимание!