

27 марта 2025 г.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Ярославцев А.Б.



TVEL

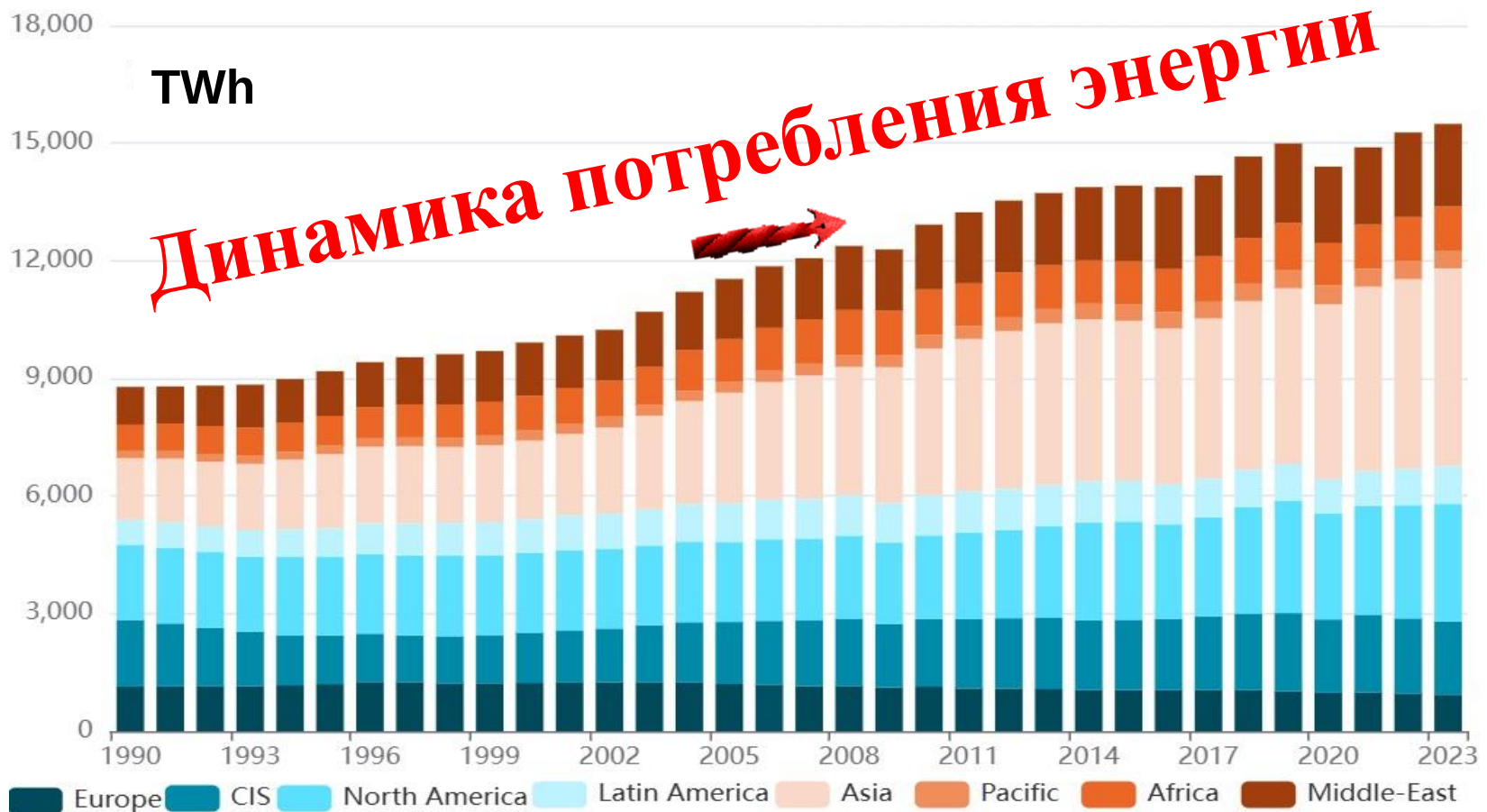
ROSATOM



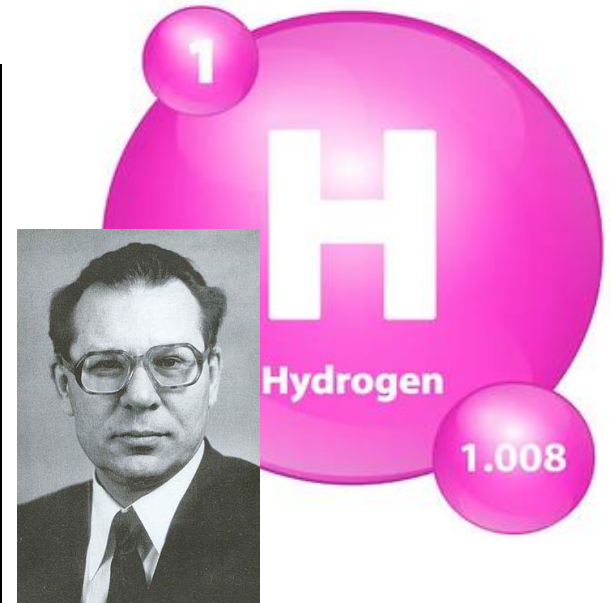
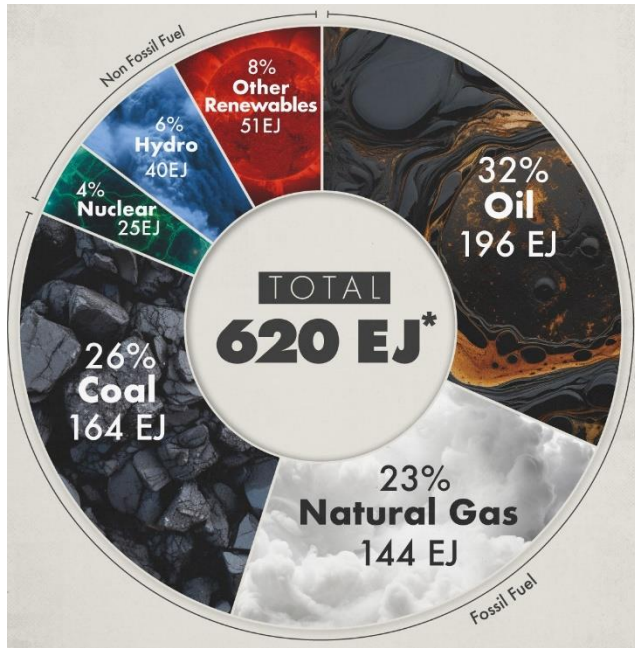
Глобальное потепление. Парниковые газы.

Энергосбережение.

Декарбонизация экономики.



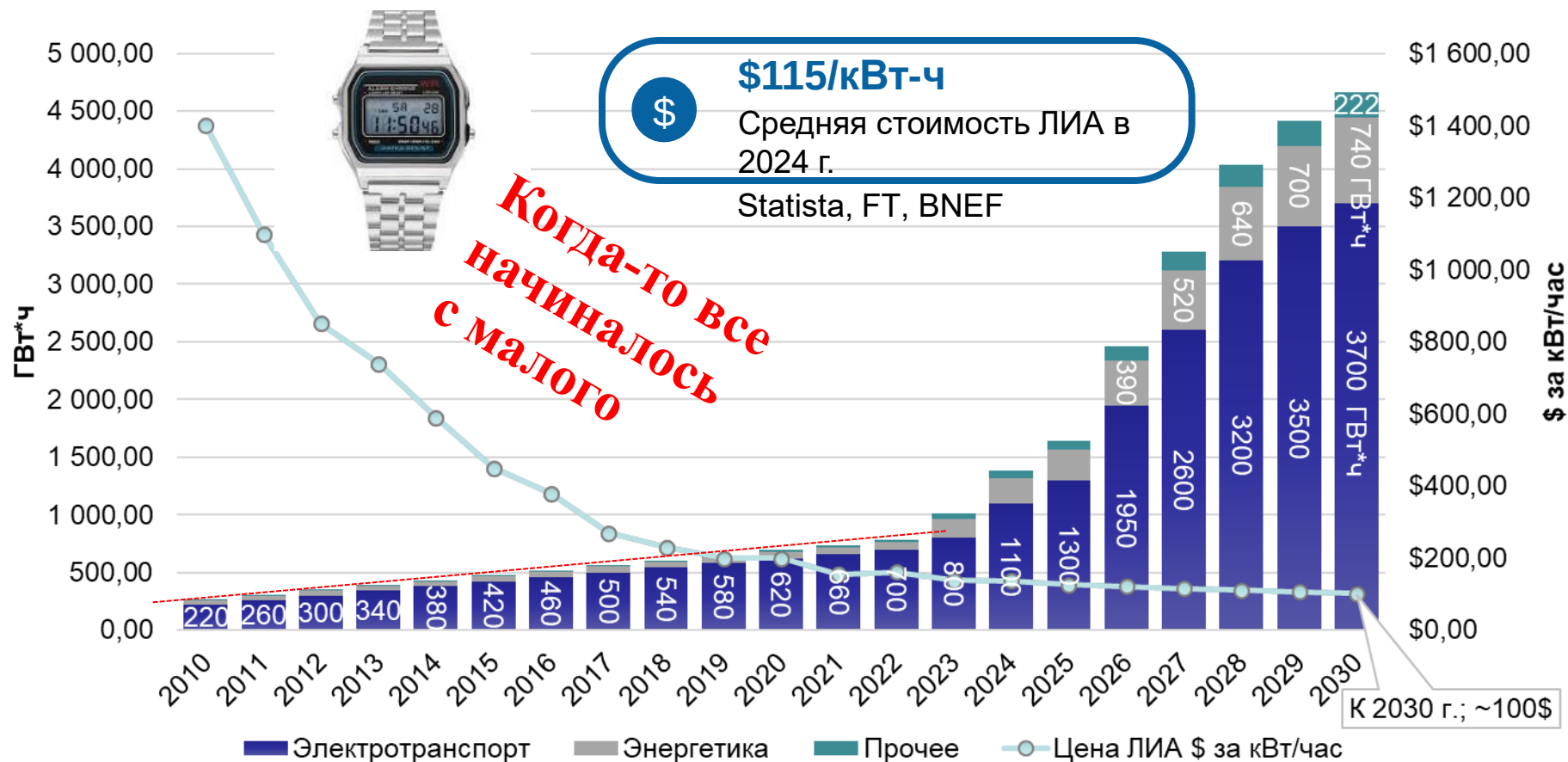
Возобновляемые источники энергии.



Легáсов Валéрий Алексéевич

Перспективы рынка

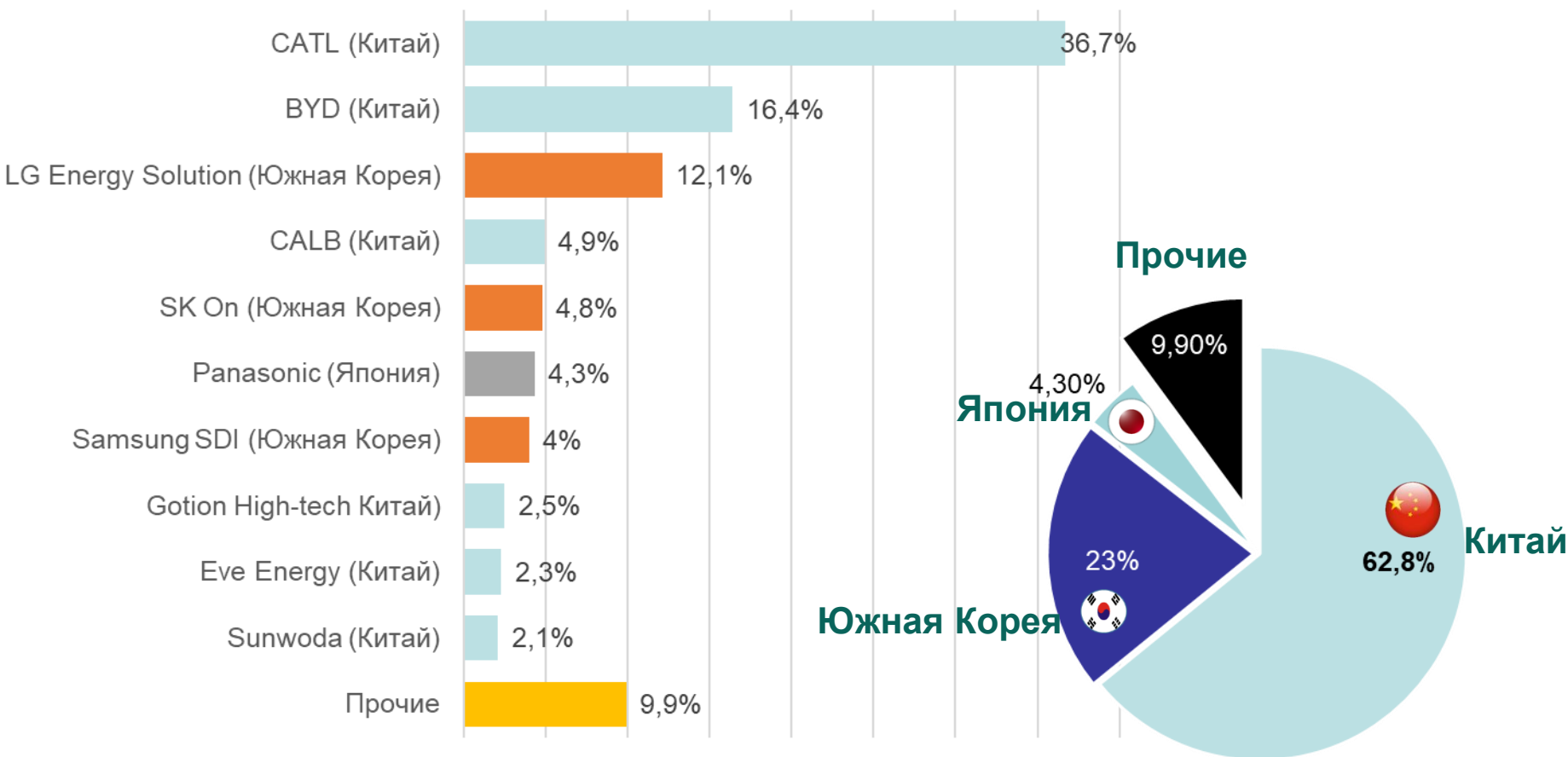
Аналитический прогноз развития мирового рынка систем накопления энергии с использованием литий-ионных батарей Анализ по результатам отчетов BloombergNEF, AVICENNE Energy, SBS Consulting



Несмотря на рост объема рынка в 2015-2019 гг., в стоимости он остался неизменным, (темпы снижения стоимости ЛИА ≈ темпам роста объема рынка)

Обзор производителей ЛИА

Мировой рынок аккумуляторов за три квартала 2024 года



Перспективы рынка ЛИА в РФ

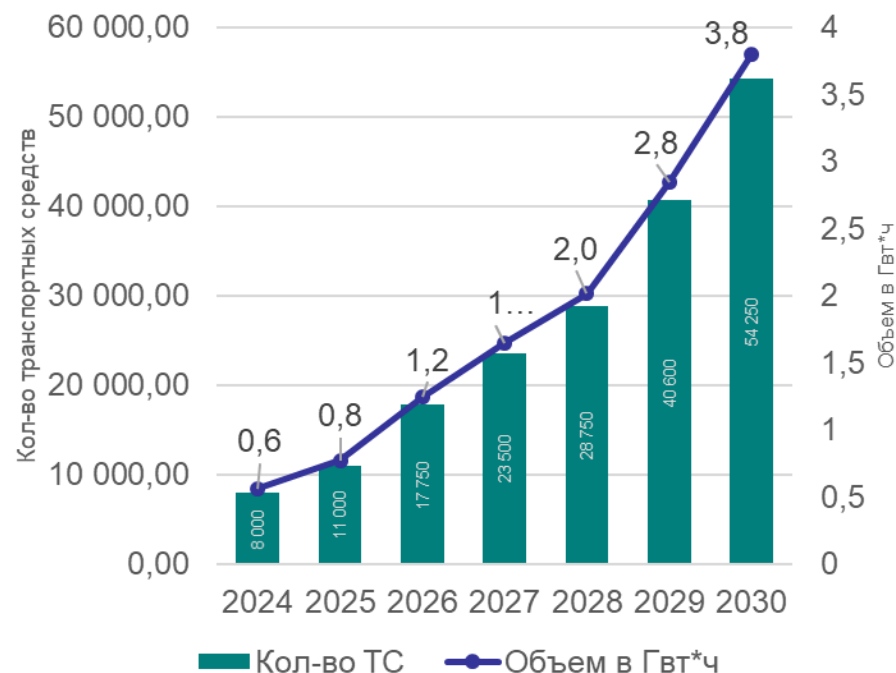
Прогнозы развития рынка ЛИА в России

в соответствии с ФП с целевыми показателями ФП «Новые технологии и производства литий-ионных и постлитиевых систем накопления электроэнергии»



Целевые показатели производства электротранспортных средств в РФ

Количество произведенных электромобилей, в том числе последовательных гибридов – в соответствии с проектом паспорта ФП «Производство инновационного транспорта»



Целевые показатели ФП «Новые технологии и производства литий-ионных и постлитиевых систем накопления электроэнергии» сформированы с учетом тенденций развития рынка и Концепции по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта.

Показатели ФП «Производство инновационного транспорта» занижены в 4 раза по сравнению с Концепцией.

РЭНЕРА – задачи в сфере литий-ионных батарей

1 Батареи для электромобилей

2 Батареи для общественного транспорта и специальной техники

3 Накопители для энергетики и ЦОД

Перспектива

- 2022 • подписан контракт на поставку батарей для Атом
- 2023 • начало строительства 2х гигафабрик в РФ
- 2022-2024 • подписан офсетный контракт с Москвой на поставку батарей для 150 тыс. Москвичей и > 5 тыс. электробусов
- > 1000 ед. - парк эксплуатируемых ТС с батареями РЭНЕРА
- Реализован ряд стационарных решений «мегаваттного» класса (Тула, Новоуральск, Электросталь)

- 2025 - 2026 • Ввод в эксплуатацию заводов (Неман, Красная Пахра общей мощностью 8 ГВт·ч (100 тыс. батарей для электромобилей)
- 2026 - 2030 • RnD центр в РФ, обеспечивающий технологический суверенитет и конкурентоспособность
- 2025 - 2030 • Локализация от «рудника до утилизации батарей» в кооперации с другими отраслевыми предприятиями
- Создание электротранспорта различного применения

В 2026 г. в России будут работать 2 гигафабрики общей мощностью 8 ГВт·ч

Высокотехнологичное роботизированное
производство полного цикла



ПРОЕКТ НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА

По созданию российских литий-ионных батарей

2 фабрики производят

100 000

батарей в год для
электромобилей

>2400

рабочих мест

60%

продукции
за контракт-
товано

При комплексных мерах государственной поддержки:
СПИК, кластерная инвестплатформа

Ключевая задача -

ЗАДАЧИ

«глубокая»

локализация



МОСКОВСКАЯ ФАБРИКА
(2026 г)

РЭНЕРА поставляет батареи для общественного и коммерческого транспорта

Для испытаний и поставок в серию



«Волгабас»

**Ситиритм 12
ELF**



**АО «Автомобильный
завод «Урал Авто»**

**УРАЛ-ЭЛЕКТРО
/ УРАЛ С220Е5-
U800074**



«Группа ГАЗ»

Газель E-CITY



«Группа ГАЗ»

E-CITY MAX



«Группа ГАЗ»

ЛИАЗ-6274



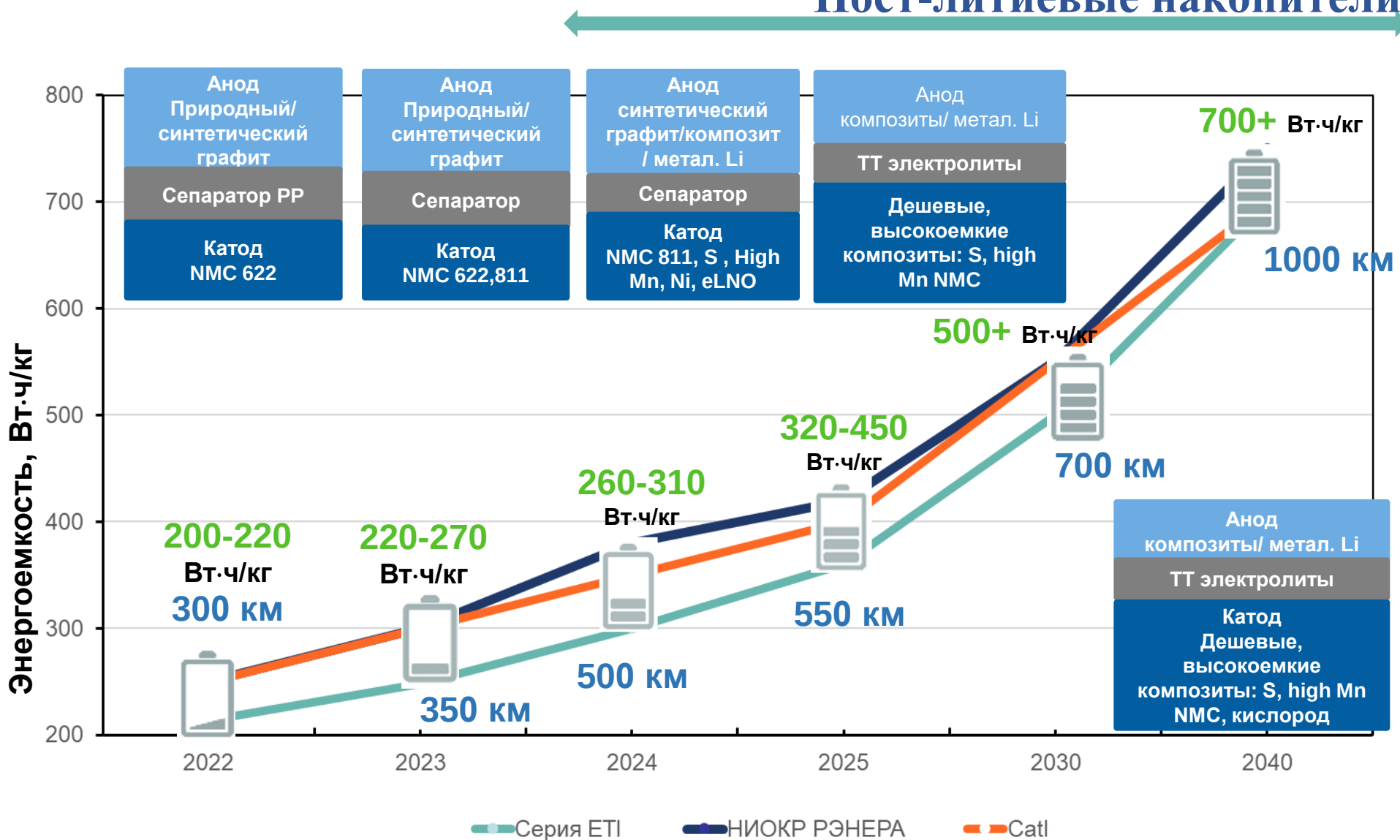
**ПАО «КАМАЗ»
(большой класс)**

**KAMAZ
6282/6282 ONC**

**Блок тяговой
батареи подходит
для различного
вида транспорта**

Планы по повышению удельной энергии серийных ячеек РЭНЕРА

Пост-литиевые накопители



В 2026 году будет открыт R&D центр в Новой Москве

В 2024 году РЭНЕРА открыла Центр Химических источников тока.

В 2026 г будет открыт российский научно-исследовательский центр в сфере ЛИАБ. **Научно-исследовательское направление:**
Локация: П.Красная Пахра

Площадь центра 2000 м²

Кадры для инноваций 225 чел.

Инжиниринговое направление:

- Разработка, проектирование, конструирование ЛИАБ
- Разработка, конструирование, испытания SKU ЛИАБ на санкционно-устойчивой базе
- Испытания, тестирование прототипов и опытных образцов разработанных ЛИАБ, СНЭЭ/ИБП
- Отработка новых технологических режимов
- Контроль качества готовой продукции

- Проектирование новых типов ячейки, модуля ЛИАБ
- Разработка, изготовление и испытания образцов новых материалов
- Разработка технологий, направленных на повышение эффективности ЛИАБ
- Математическое моделирование процессов эксплуатации ЛИАБ и СНЭЭ/ИБП
- Разработка новых видов ХИТ, альтернативных литий-ионным

ЛИАБ – литий-ионные батареи
СНЭЭ – система накопления электроэнергии
ИБП – источник бесперебойного питания

SKU – система контроля и управления
ХИТ – химические источники тока

Прогнозная потребность отрасли накопителей энергии к 2030 г. более 4300 чел./год

№ п/п	Наименование организации	Регион	Потребность итогом чел./год.		
			2023	2025	2030
1	ООО «РЭНЕРА» (Гигафабрика)	г. Калининград	0	639	1888
2	ООО «РЭНЕРА» (Гигафабрика)	г. Москва	0	639	1888
3	АО «Энергия»	г. Елец	79	79	79
4	АО «АВЭКС»	г. Москва	22	68	122
5	АО «НПП "Пульсар»	г. Москва	15	59	163
6	ООО «НТЦ АНК»	г. Санкт-Петербург	3	33	42
7	НЗР Оксид	г. Новосибирск	10	31	31
8	ООО «ТЭЭМП Производство»	г. Химки	16	26	26
9	АО «Гиредмет»	г. Москва	16	16	16
10	ООО «НПО «Центротех»	г. Екатеринбург	0	13	18
11	ООО «Глобал СО»	г. Химки	3	11	22
12	АО «НИИГрафит»	г. Москва	4	8	24
13	АО «АЭПС»	г. Москва	4	4	4
14	ПАО «КМЗ» (ТВЭЛ)	г. Ковров	2	2	2
15	ООО «Вайн-ЛИА»	Республика Чечня	0	0	16
16	АО «Сатурн»	г. Краснодар	н/д	н/д	н/д
17	ООО «Уралэлемент»	г. Верхний Уфалей	н/д	н/д	н/д
18	ООО «САЗ»	г. Санкт-Петербург	н/д	н/д	н/д
13	АК «Ригель»	г. Санкт-Петербург	н/д	н/д	н/д
14	ООО «Уралэлемент»	г. Верхний Уфалей	н/д	н/д	н/д

Ассоциация развития технологий систем накопления энергии

Металлион,

Транспорт будущего...

Сравнение электрохимических систем ЛИА



Портативная электроника,
электротранспорт, дроны,
стационарные накопители энергии



Стационарные накопители энергии,
электромобили, локомотивы,
электробусы, погрузчики

Достоинства

Высокая энергоёмкость или высокая
мощность (зависит от конструкции)

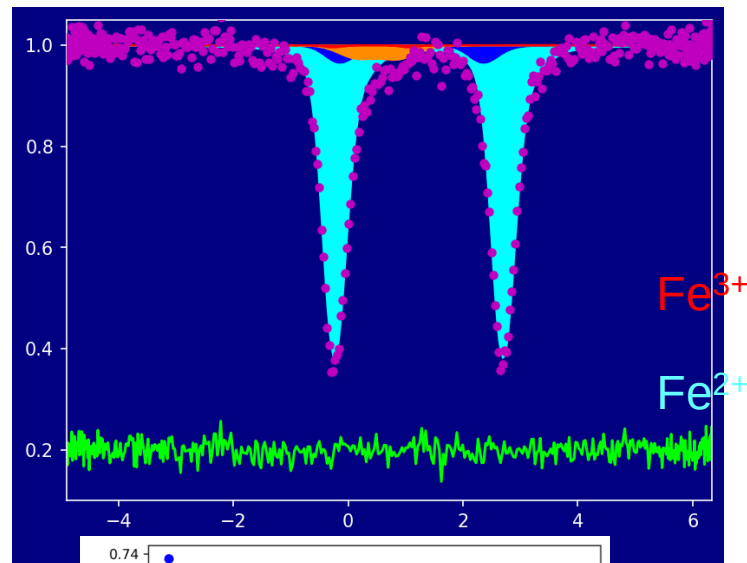
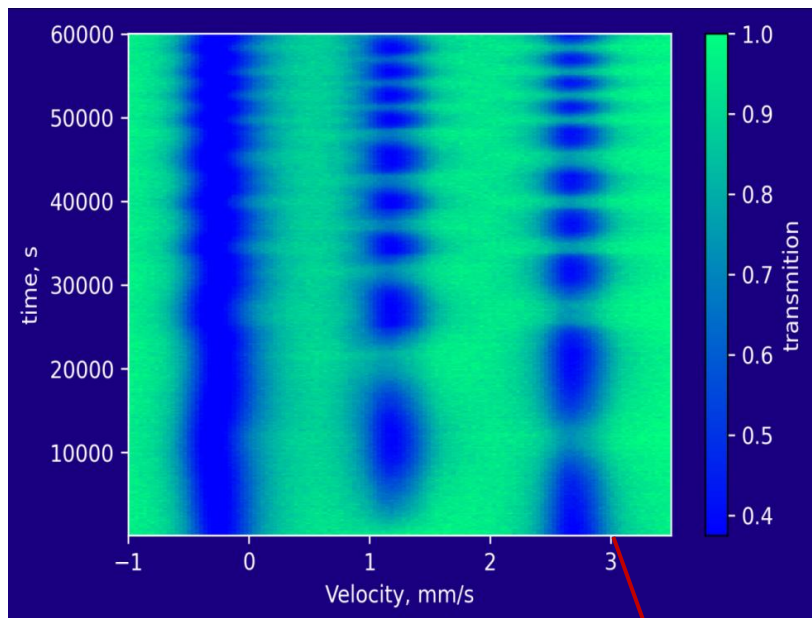
Высокая безопасность, простая
утилизация, низкая цена

Недостатки

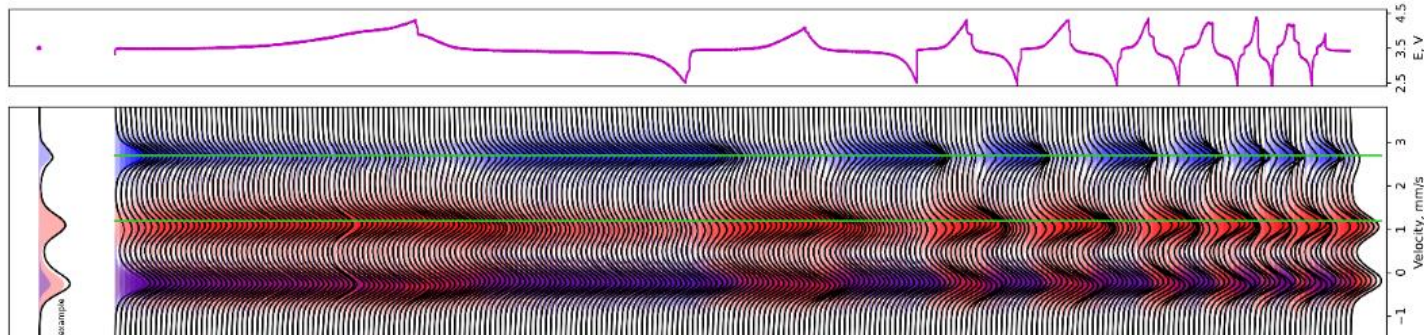
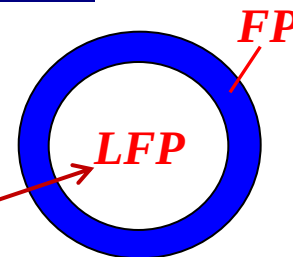
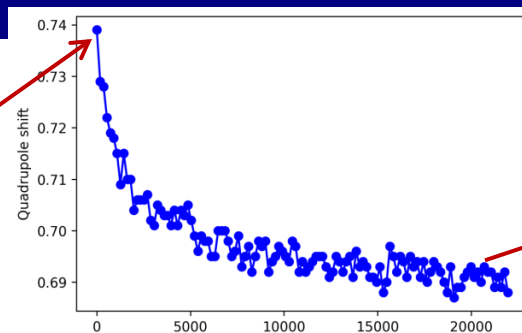
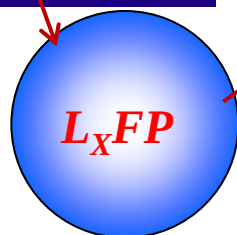
Проблемы с безопасностью, сложность
утилизации

Энергоёмкость в 1.5 раза уступает ЛИА
NMC

Operando Мессбауэровская спектроскопия $\text{LiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{PO}_4$



ЕСРФ – ИОНХ РАН



Stenina I., Kulova T., Yaroslavtsev A. // Mater. Today Chem. 2024, V.39 N102160

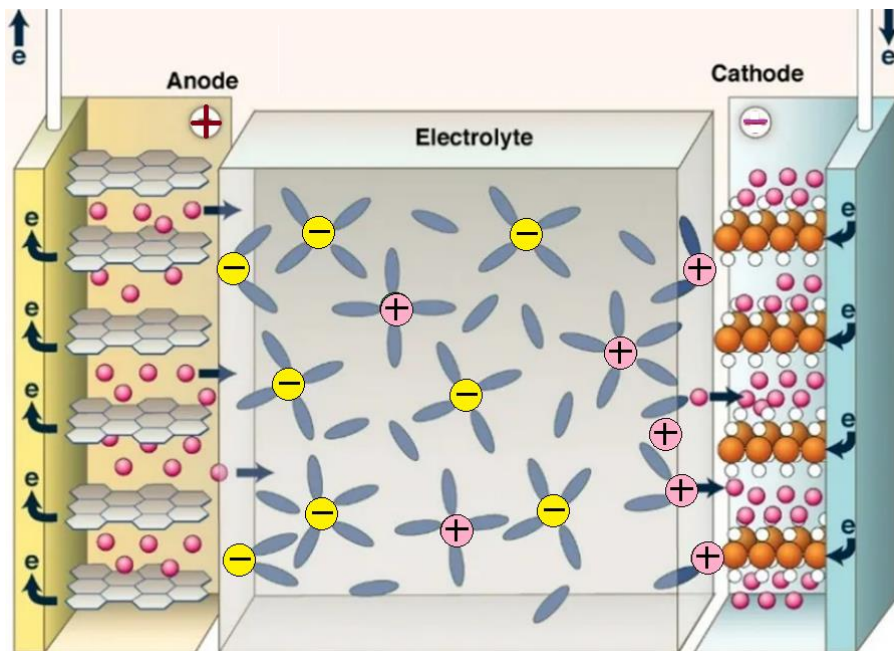
Yaroslavtsev S., Müller S.C. // Mater. Today Chem. 2024, V.39 N102159

Твердые электролиты для ЛИА

Жидкие электролиты для ЛИА

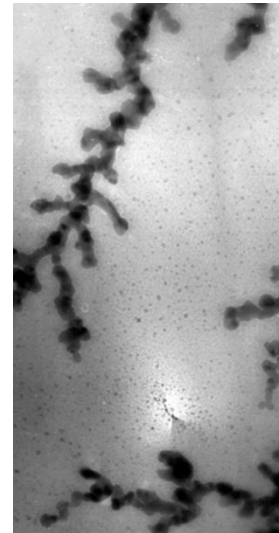
Апротонный растворитель + соль лития с крупным анионом ($LiPF_6$, $LiClO_4$) + добавки.

Низкие числа переноса лития ≈ 0.3



SATL - Плотность энергии до 500 Втч/кг. «Конденсированный» электролит в «полутвердом» состоянии.

Поляризация



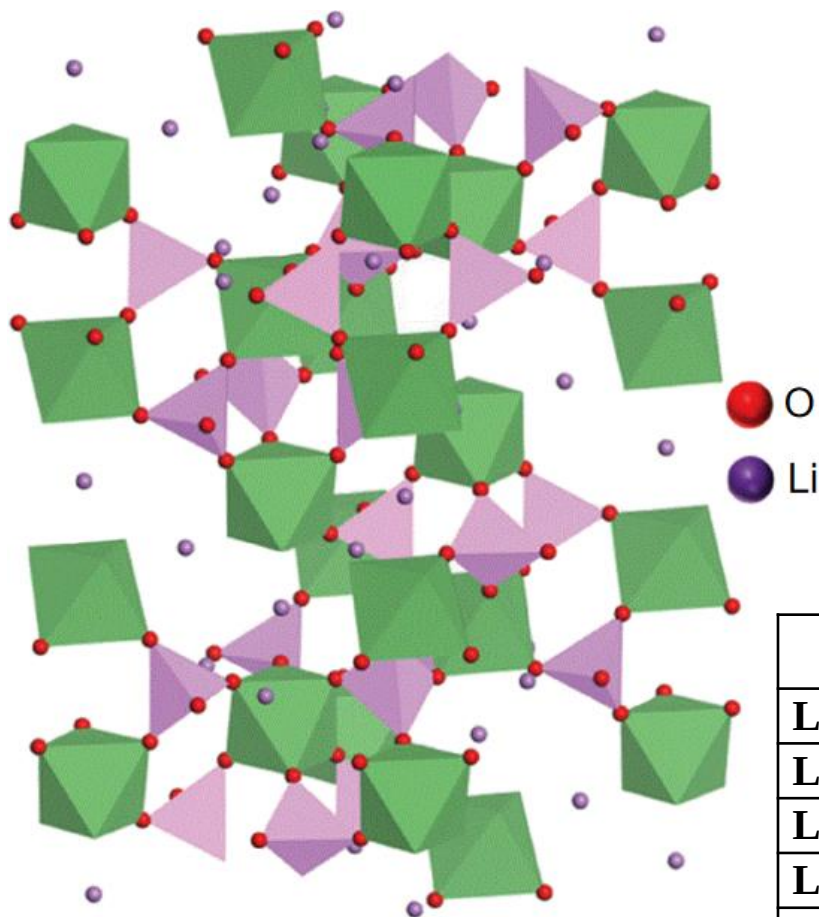
Рост дендритов

Короткое замыкание

Материалы со структурой NaSiCon

$\text{Na}_2\text{Zr}_2\text{SiP}_2\text{O}_{12}$ с ионной
проводимостью $0.1 \text{ СМ}\cdot\text{СМ}^{-1}$

$\text{Li}_3\text{A}^{\text{III}}_2(\text{XO}_4)_3$, $\text{LiA}^{\text{IV}}_2(\text{XO}_4)_3$,
 $\text{A}^{\text{III}} = \text{Al, Cr, Fe...};$
 $\text{A}^{\text{IV}} = \text{Ti, Ge, Sn, Zr, Hf};$
 $\text{X} = \text{P or Si}$



NASICON structure

Electrolyte	$\sigma, \text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
$\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Sn}_{0.35}\text{Ti}_{1.35}(\text{PO}_4)_3$	$4.7\cdot 10^{-4}$
$\text{Li}_{1.2}\text{Al}_{0.2}\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$	$7.9\cdot 10^{-4}$
$\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.21}\text{B}_{0.08}\text{In}_{0.01}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$	$1.1\cdot 10^{-3}$
$\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{0.4}\text{Ti}_{1.4}\text{Ge}_{0.2}(\text{PO}_4)_3$	$1.3\cdot 10^{-3}$
$\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{0.15}\text{Fe}_{0.25}\text{Ti}_{1.6}(\text{PO}_4)_3$	$2.2\cdot 10^{-3}$
$\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.4}\text{Cr}_{0.1}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$	$6.6\cdot 10^{-3}$

Stenina I.; Novikova S.; Voropaeva D.; Yaroslavtsev A./ Batteries 2023, 9, 407.

Ил'ина Е./ Int. J. Mol. Sci. 2023, 24, 12905. (Гранат)

Сульфидные электролиты

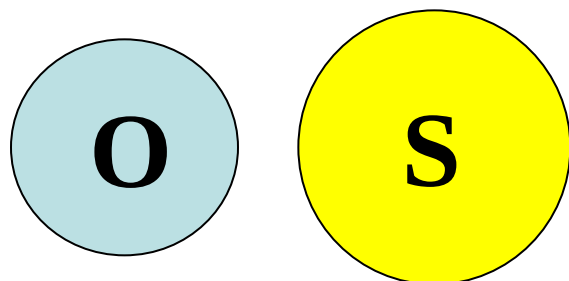
Электролит	σ , См·см ⁻¹
Li_3PS_4	$1.6 \cdot 10^{-4}$
$\text{Li}_4\text{P}_2\text{S}_6$	$2 \cdot 10^{-6}$
$\text{Li}_7\text{P}_3\text{S}_{11}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
$\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
$\text{Li}_{10}\text{SnP}_2\text{S}_{12}$	$3.2 \cdot 10^{-3}$
$\text{Li}_{10}\text{SiP}_2\text{S}_{12}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$
$\text{Li}_{11}\text{AlP}_2\text{S}_{12}$	$8.0 \cdot 10^{-4}$
$\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
$\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Br}$	$3.1 \cdot 10^{-3}$

Li_3PS_4 , $\text{Li}_7\text{P}_3\text{S}_{11}$, $\text{Li}_4\text{P}_2\text{S}_7$

$\text{Li}_2\text{P}_2\text{S}_6$, $\text{Li}_4\text{P}_2\text{S}_6$

$\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$, $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$

Высокая поляризуемость аниона



высокая проводимость

более пластичный

меньшая прочность

низкая химическая стабильность

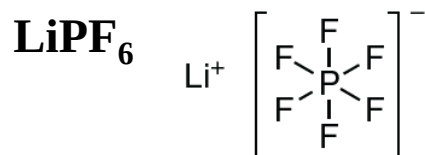
низкая термическая стабильность

Полимерный электролит

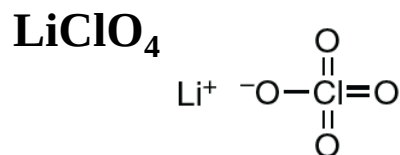
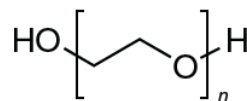
полимер/соль

На основе
ионообменных мембран

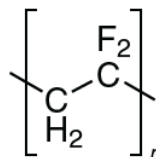
Химическое строение наиболее
распространенных солей лития и
полимерных матриц



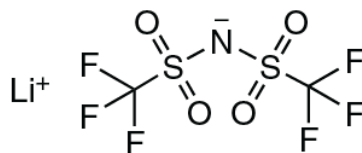
PEO



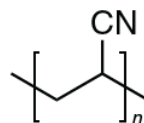
PVDF



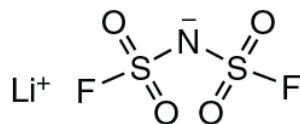
LiTFSI



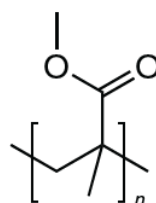
PAN



LiFSI



PMMA



Технология литиевых
аккумуляторов (2011 г.) на
основе полимерных
электролитов с ПЭО
позволила создать более
8000 электромобилей.

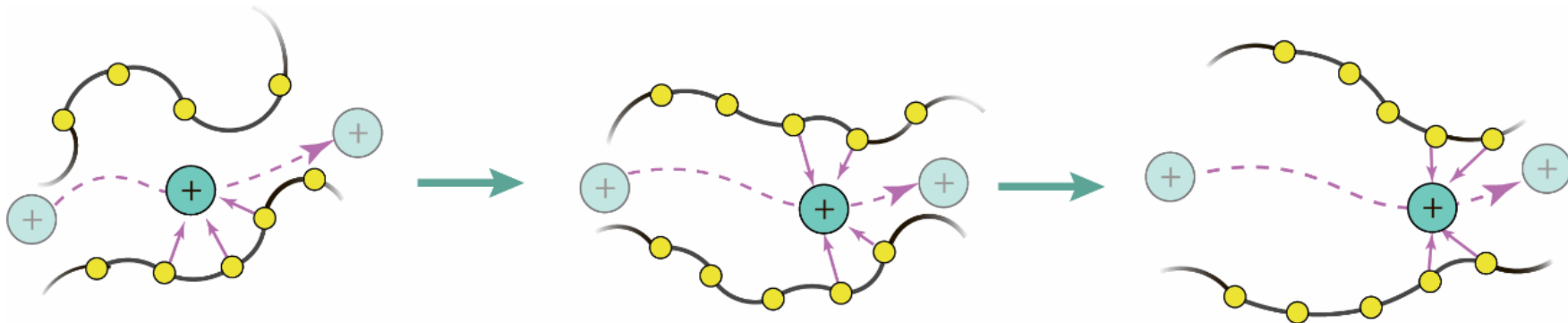
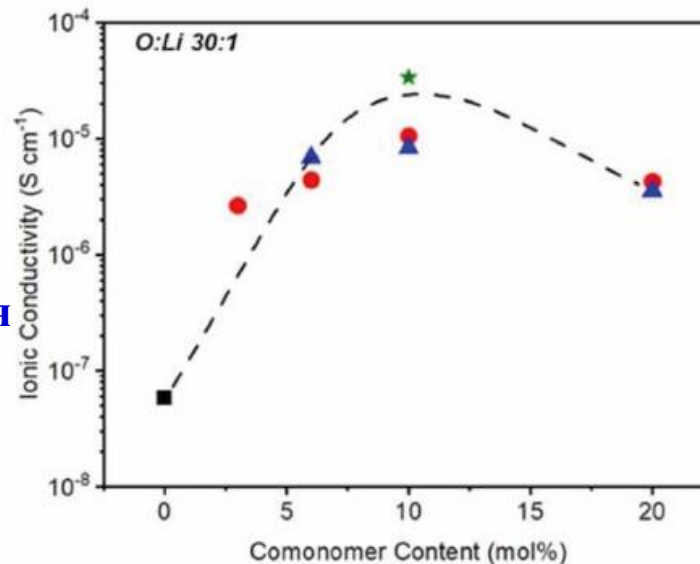
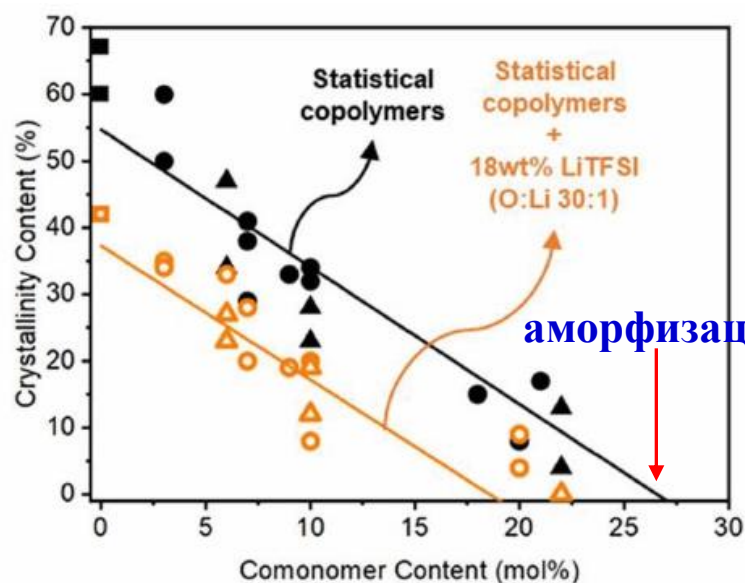


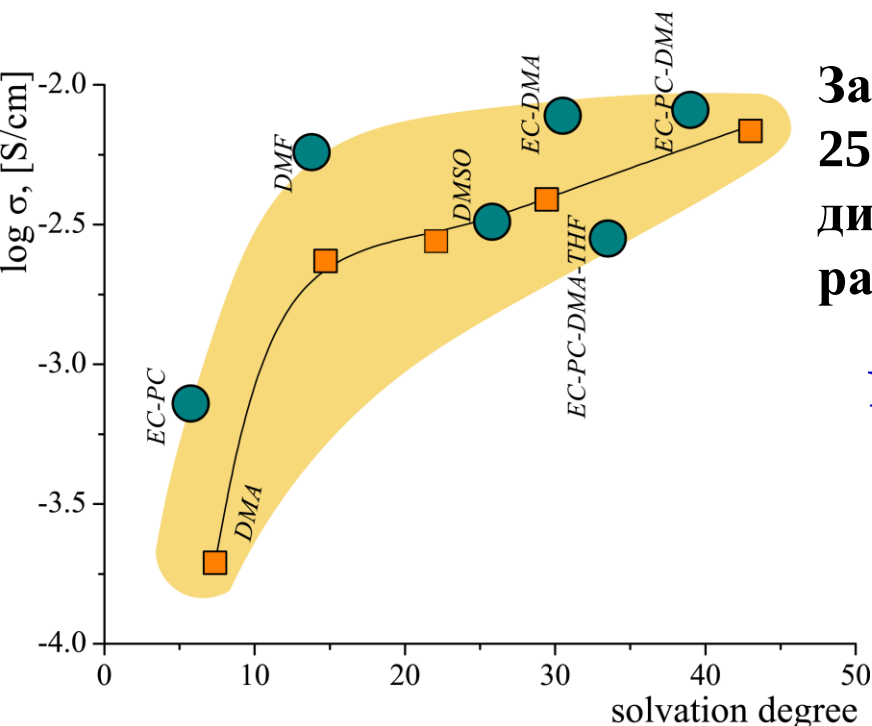
Схема транспорта катионов лития в аморфной части ПЭО



Такая же
зависи-
мость для
концентра-
ции соли

Зависимость степени кристалличности и ионной проводимости от содержания сополимера (ПЭО + полипропиленоксид) при статистической сополимеризации.

Ионообменные мембраны как электролиты металл-ионных аккумуляторов

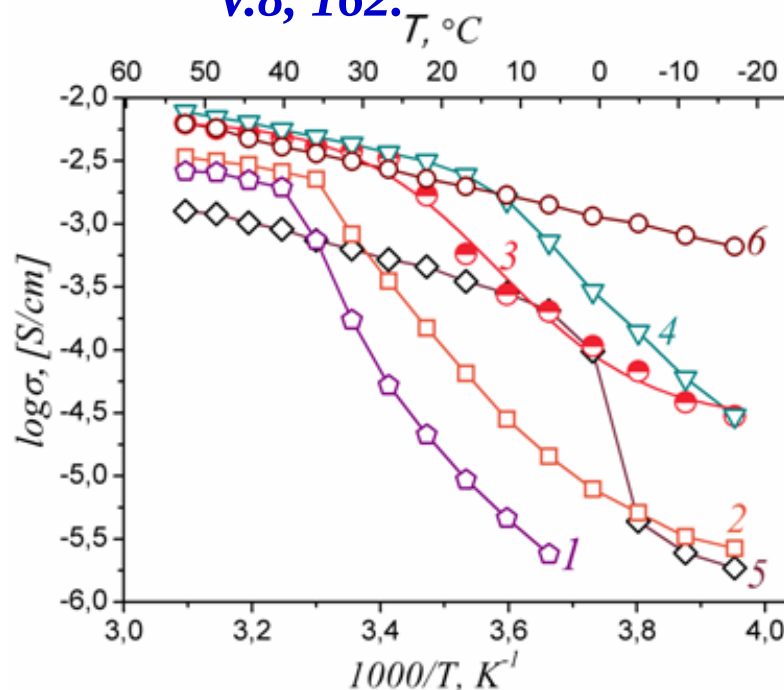


Зависимость ионной проводимости при 25 °С полимеров, сольватированных диметилацетамидом (квадраты) и другими растворителями (кружки).

Yaroslavtsev A.B., Novikova S.A., Voropaeva D.Y., Li S.A., Kulova T.L.// *Batteries* 2022, V.8, 162.

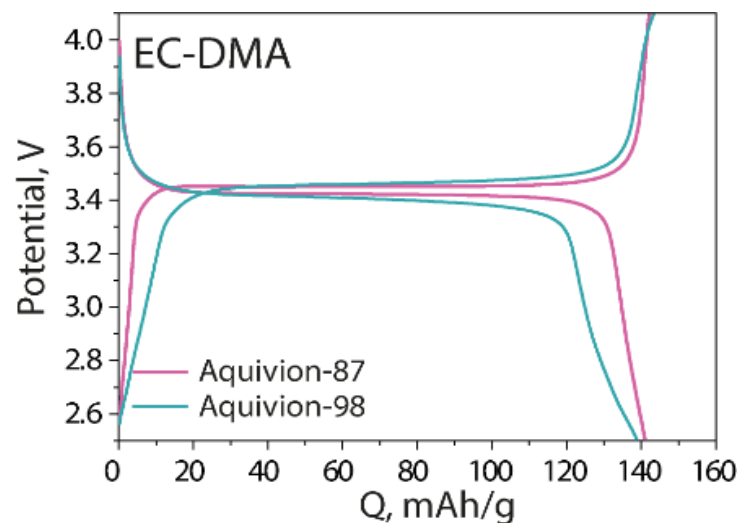
Температурные зависимости проводимости мембран Нафилон, сохраняемых в смеси растворителей:

ЭК-ТГФ (1); ЭК-ДМОЕ (2);
ЭК-ММАА(3); ЭК-ДЭК-ДМА (4);ЭК-ПК
(5), ПК-ДМАА-ТГФ (6).



Короткоцепочечные фторполимеры (АКВИВИОН)

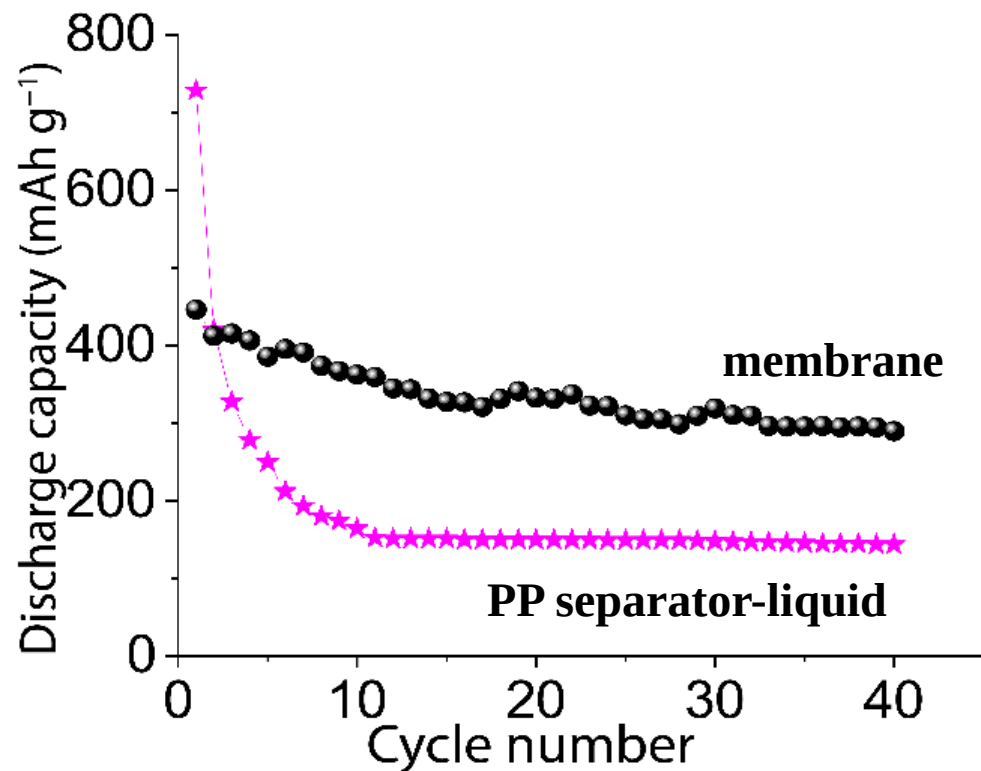
Ионная проводимость и кривые
заряда-разряда для ячеек LFP|Li с
Aquivion-ЭК-диметилацетамидом и
жидким электролитом при скорости
циклирования 0,1С, 25°С, 20-й
цикл.



**Voropaeva D., Safronova E., Novikova
S., Yaroslavtsev A.B./ J. Phys. Chem. C,
2024, V. 128, P. 4143–4151**

Ионообменные мембраны для Li-S- аккумуляторов (Li/X/S)

Тестирование (S-C)/Nafion-Li⁺-ДОЛ-ДМЭ/Li



Разрядная емкость Li-S аккумулятора в
ячейке с жидким электролитом и мембраной

Композиционные электролиты

Целью формирования является совмещение преимуществ неорганических и полимерных электролитов

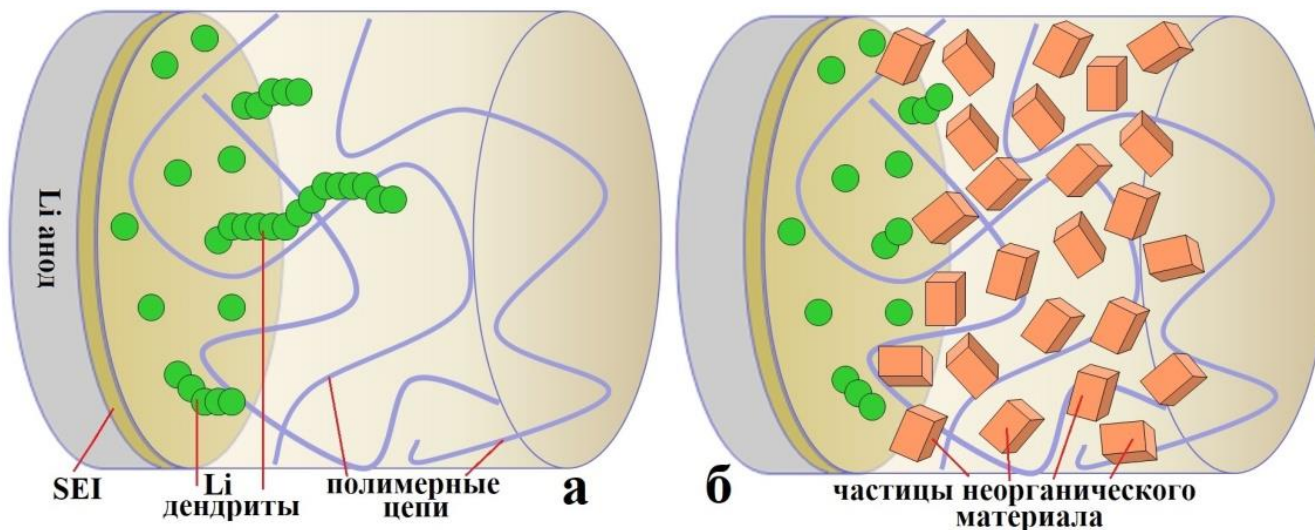


Схема роста дендритов в полимерном (а) и композиционном (б) электролитах

*D.Yu.Voropaeva, I.A.Stenina, A.B.Yaroslavtsev.
Russian Chemical Reviews, 2024, V.93, N6*

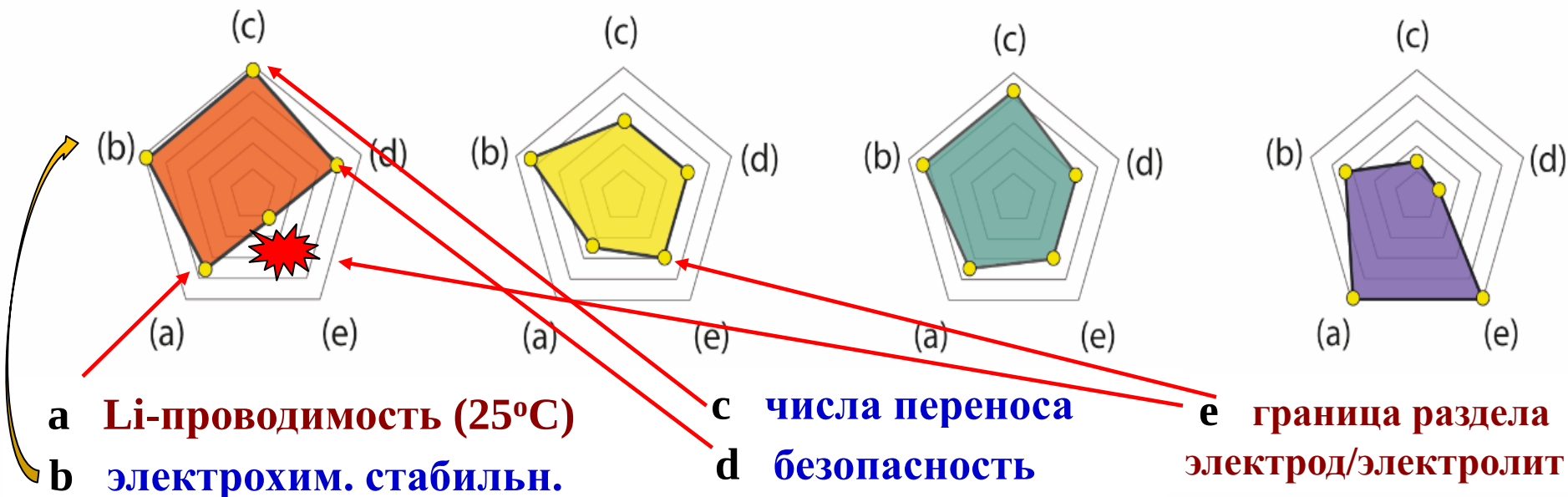
Сравнение основных характеристик различных электролитов для литиевых аккумуляторов

inorganic

polymer

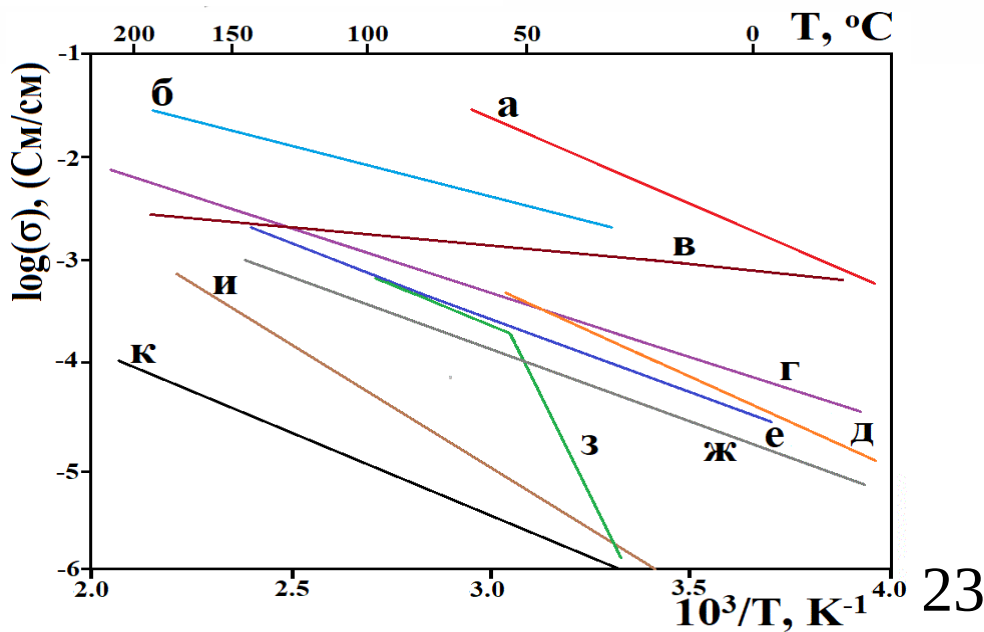
composite

liquid



D.Yu.Voropaeva, I.A.Stenina, A.B.Yaroslavtsev.
Russian Chemical Reviews, 2024, V.93, N6

Температурные зависимости ионной проводимости для $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ (а), $\text{Li}_7\text{P}_3\text{S}_{11}$ glass ceramics (б), Li_3OCl (в), $\text{Li}_{1.2}\text{Al}_{0.2}\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ (г), Nafion-PC-EC (д), PVDF-LiFSI (е), $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (ж), PEO-LiTFSI (з).



Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 - 2030 годы).

2.2.4.4. Фундаментальные основы материаловедения энергогенерирующих и энергоаккумулирующих устройств (новая формулировка)

Предложения Росатома (РЭНЕРы):

- ✓ разработка способов извлечения лития из разбавленных растворов;
- ✓ разработка катодных материалов для литий-ионных аккумуляторов с высокой надежностью и циклируемостью, в том числе при высокой плотности тока;
- ✓ разработка высокочастотных композиционных анодных материалов для литий-ионных аккумуляторов, сохраняющих высокую емкость при циклировании, в том числе при высокой плотности тока;
- ✓ разработка твердых (неорганических, полимерных и композиционных) электролитов для литий-ионных аккумуляторов с высокой ионной проводимостью и электрохимической стабильностью;
- ✓ разработка катодных, анодных материалов и электролитов для натрий-ионных и литий-серных аккумуляторов с повышенной циклируемостью и емкостью;
- ✓ совершенствование технологий производства литий-ионных аккумуляторов;
- ✓ создание эффективных способов переработки литий-ионных аккумуляторов



Благодарю за внимание

**Благодарю за предоставленные материалы:
Ассоциацию развития технологий систем накопления энергии,
ООО «РЭНЕРА»**