

---

# **Перспективы вывода на рынок новых катодных материалов ЛИА**

Артем М. Абакумов

Центр энергетических технологий, Сколтех  
ООО “Рустор”

# Поколения катодных материалов

Поколение	Материал	Емкость, мАч/г	V отн. Li <sup>+</sup> /Li, В	Доступность
#1а	LiCoO <sub>2</sub> (LCO)	140	2.7-4.3	на рынке
#1б	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (LMO)	120	3.5-4.3	на рынке
#2а	LiNi <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> Co <sub>1/3</sub> O <sub>2</sub> (NMC111) LiNi <sub>0.5</sub> Mn <sub>0.3</sub> Co <sub>0.2</sub> O <sub>2</sub> (NMC532) LiNi <sub>0.6</sub> Mn <sub>0.2</sub> Co <sub>0.2</sub> O <sub>2</sub> (NMC622)	160-180	2.7-4.3	на рынке
#2б	LiNi <sub>0.84</sub> Co <sub>0.12</sub> Al <sub>0.04</sub> O <sub>2</sub> (NCA)	210	2.7-4.3	на рынке
#2в	нанокристаллический LiFePO <sub>4</sub> (насыпная плотность 0.8 – 1.1 г/см <sup>3</sup> )	145-155	2.5-4.2	на рынке
#3а	LiNi <sub>0.8</sub> Mn <sub>0.1</sub> Co <sub>0.1</sub> O <sub>2</sub> (NMC811)	190-200	2.7-4.3	на рынке
#3б	агломерированный LiFePO <sub>4</sub> (насыпная плотность 1.5 – 1.7 г/см <sup>3</sup> )	160	2.5-4.2	ограниченная доступность

# Поколения катодных материалов

Поколение	Материал	Емкость, мАч/г	V отн. Li <sup>+</sup> /Li, В	Доступность
#4а	LiNi <sub>0.9</sub> Mn <sub>0.05</sub> Co <sub>0.05</sub> O <sub>2</sub> (NMC9 0.5 0.5) LiNi <sub>0.95</sub> Mn <sub>0.025</sub> Co <sub>0.025</sub> O <sub>2</sub> (NMC952525) LiNiO <sub>2</sub>	220-240	2.7-4.3	в разработке
#4б	монокристаллические NMC622, NMC811, NMC952525	180-220	2.7-4.3	ограниченная доступность
#5	градиентные структуры и структуры “ядро-оболочка” NMC811, NMC952525	195-210	2.7-4.3	в разработке
#6а	высоковольтные LCO, NMC622	190-210	3.0-4.5	в разработке
#6б	высоковольтные LiFe <sub>1-x</sub> Mn <sub>x</sub> PO <sub>4</sub> , LiFe <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> Co <sub>1/3</sub> PO <sub>4</sub>	155-160	2.7-4.3	в разработке
#7	обогащенные литием Li <sub>1.2</sub> Ni <sub>0.13</sub> Mn <sub>0.54</sub> Co <sub>0.13</sub> O <sub>2</sub>	270-300	2.2-4.8	в разработке (возможно, тупик)

# Слоистые катодные материалы: потребности РФ

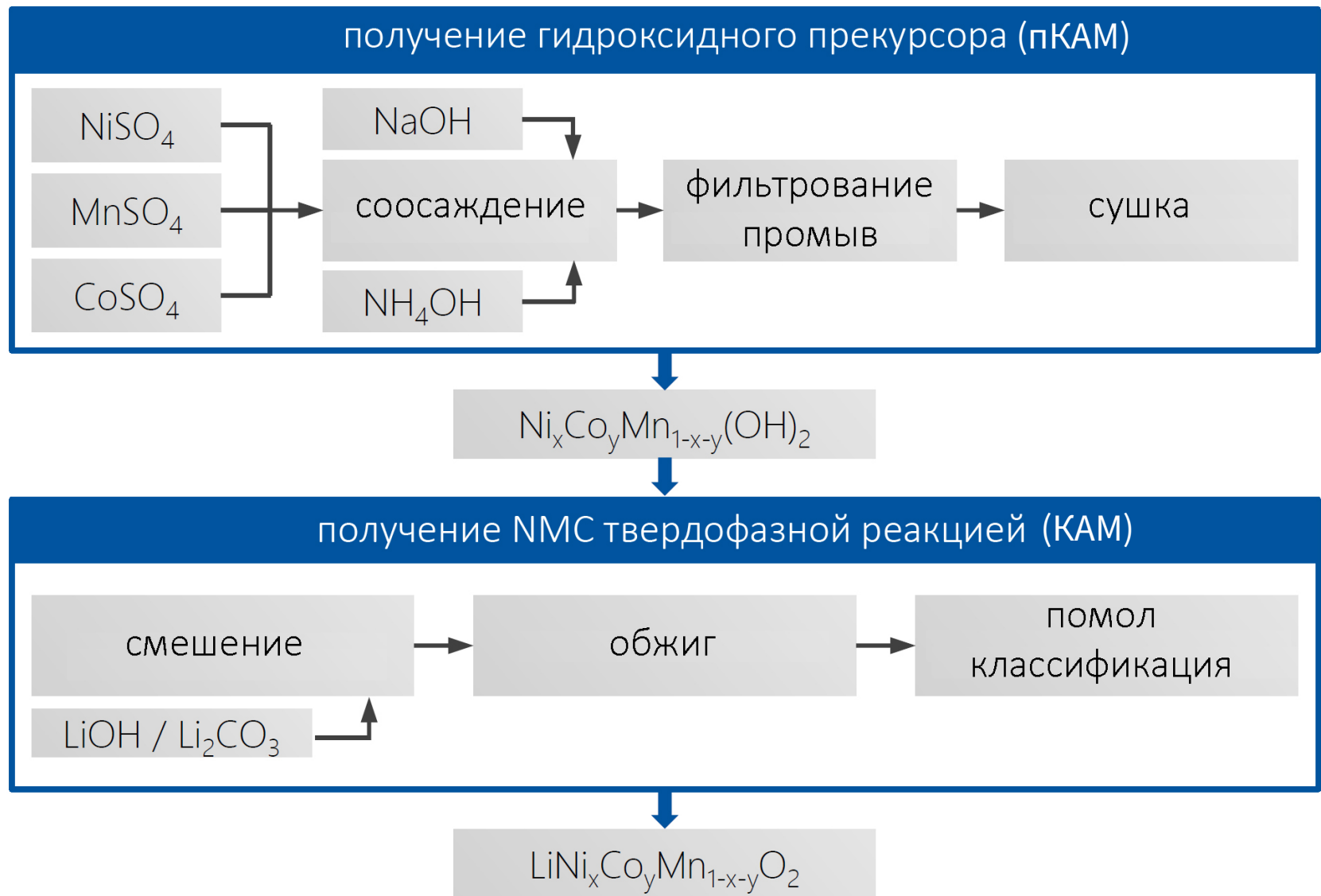
Производство 1 МВтч ЛИА требует

- 1.54 тонн катодного материала (удельная энергоемкость ~180 Ач/кг)
- 1.32 тонн катодного материала (удельная энергоемкость ~210 Ач/кг)

Обеспечение производства на 4 ГВтч/год потребует 5.300 – 6.200 т/год катодного материала

Год	ЛИА для электротранспорта		
	Потребление ЛИА, ГВтч/год	потребление катодного материала NMC, т/год	Стоимость катодного материала NMC, млн. руб./год
2020	0.1	150	500
2025	4.5	6,000	25,000
2030	13.0	16,500	76,000
	Удельная энергия NMC, Втч/кг	Стоимость NMC, \$/кг	
2020	650	36	
2025	750	45	
2030	790	50	

# Технологии ООО “Рустор”



# Технологии ООО “Рустор”

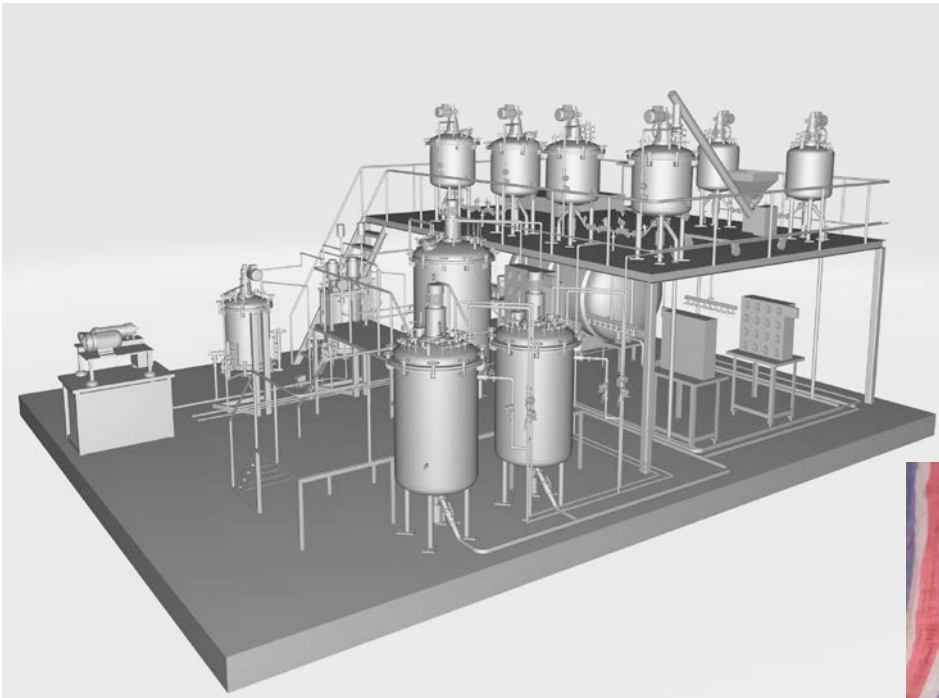


Пилотная установка непрерывного соосаждения пКАМ до 5 тонн/год, 2023\*

\*работы выполнялись в рамках гранта ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере», договор 826ГРНТИС5/78228



# Технологии ООО “Рустор”



2025: автоматизированная проточная реакторная система получения пКАМ до 20-30 тонн/год



2024: проходная роликовая печь высокотемпературного литирования пКАМ до 85 тонн/год

# Масштабирование производства КАМ

## 1. Оценка инвестиций:

Завод	Производительность КАМ, ГВтч/год	Инвестиции, млн.\$/ГВтч КАМ
Umicore, Nysa, Poland	20	36
BASF, Elyria, Ohio	1.6	31
BASF, Harjavalta (пКАМ) Schwarzheide (КАМ)	20	22
Posco Future M, Gwangyang	40	14
LG Chem, Clarksville, Tennessee	95	32
	<b>Среднее:</b>	<b>27</b>

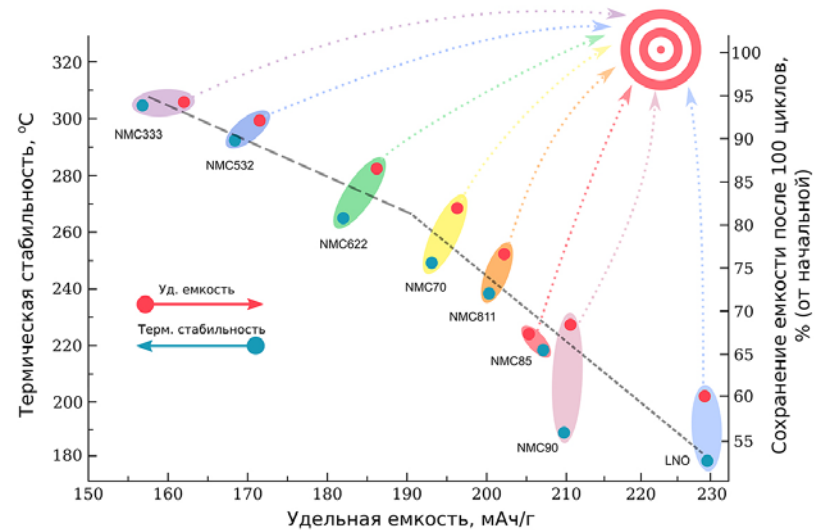
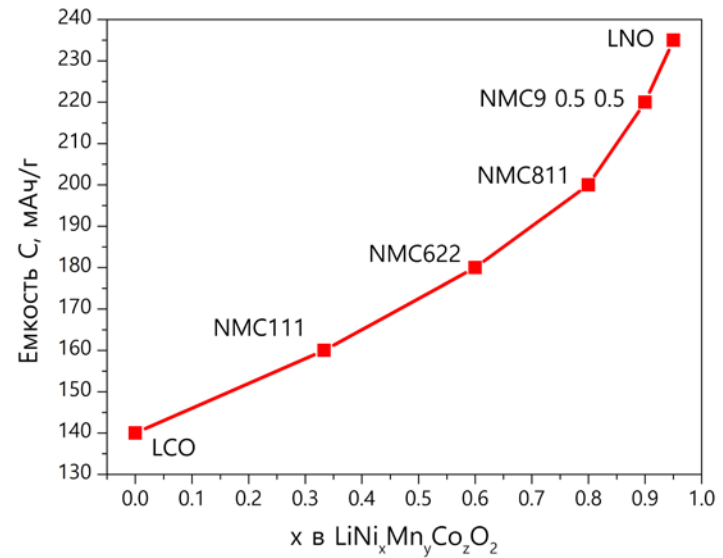
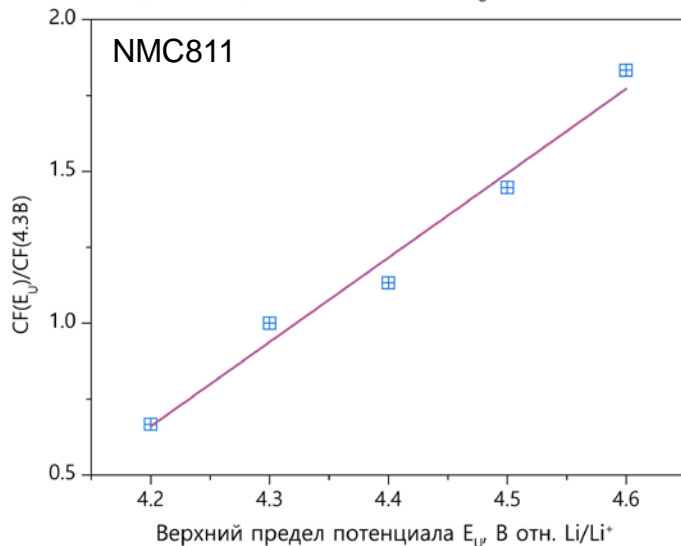
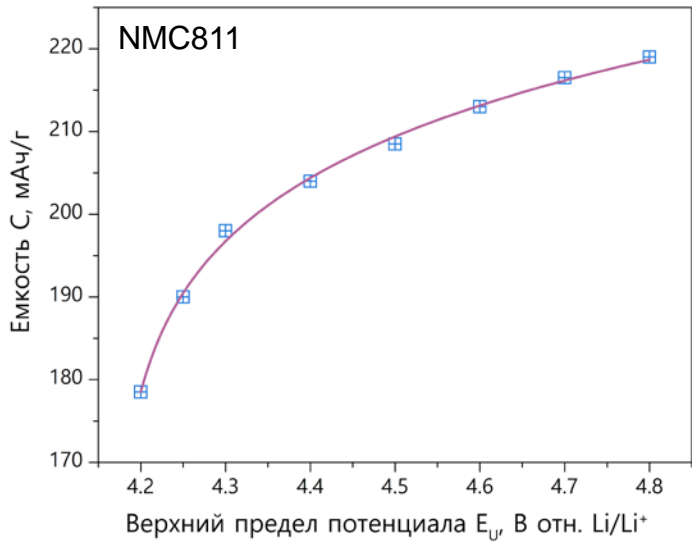
Производство КАМ в объеме 12 ГВтч/год (планируемое производство ЛИА в ООО “Рэнера”) потребует инвестиций в ~30 млрд. руб.

2. Доступность высокочистых сульфатов Ni, Mn и Co батареечного качества (~39,000 тонн, ~2,300 тонн, ~3,700 тонн в год)

3. Гарантированный рынок сбыта (срок хранения высоконикелевых NMC от 6 до 12 мес.)



# Катоды NMC: статистические данные



# Химическая модификация NMC811

1 IA																	18 VIIIA	
1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.0026	
3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.0122																	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305																	18 Ar Argon 39.95
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.630	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798	
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium (97)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29	
55 Cs Caesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57-71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)	
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89-103 Actinides	104 Rf Rutherfordium (267)	105 Db Dubnium (268)	106 Sg Seaborgium (269)	107 Bh Bohrium (270)	108 Hs Hassium (268)	109 Mt Meitnerium (276)	110 Ds Darmstadtium (261)	111 Rg Roentgenium (282)	112 Cn Copernicium (285)	113 Nh Nihonium (286)	114 Fl Flerovium (289)	115 Mc Moscovium (290)	116 Lv Livermorium (293)	117 Ts Tennessine (294)	118 Og Oganesson (294)	

- - основные элементы
- - решеточное допирование
- - покрытия

57 La Lanthanum 138.91	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.91	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.96	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.93	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93	70 Yb Ytterbium 173.05	71 Lu Lutetium 174.97
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.04	91 Pa Protactinium 231.04	92 U Uranium 238.03	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (260)

# Химическая модификация NMC811

Russian Chemical Reviews July 2023 92 (7)

ZIOC RAS  
Uspekhi Khimii  
Russian Academy of Sciences

## Russian Chemical Reviews

key component of future energy

28  
**Ni**  
Nickel

- suitable redox potential
- low toxicity
- structure stability
- moderate reserve
- two-electron redox

RCR5086

Reviews on current topics in chemistry

### Volume 92 2023 Issue 7

ISSN 0036-021X

A. A. Savina, A. O. Boev, E. D. Orlova, A. V. Morozov, A. M. Abakumov  
Russ. Chem. Rev., 2023, 92 (7) RCR5086 [Успехи химии, 2023, 92 (7) RCR5086]

Русская версия <https://www.uspkhim.ru/RCR5086>

<https://doi.org/10.59761/RCR5086>

## Никель — ключевой элемент энергетики будущего

А.А.Савина, А.О.Боев, Е.Д.Орлова, А.В.Морозов, А.М.Абакумов

Сколковский институт науки и технологий,  
Россия, 121205 Москва, Большой бульвар, 30 стр. 1

В обзоре обсуждены комплекс свойств никеля и его роль как критически важного элемента для обеспечения уверенного перехода к новому технологическому укладу с отказом от ископаемого топлива в пользу передовых систем электрохимического хранения и преобразования энергии. Рассмотрены основные классы никельсодержащих материалов для положительных электродов (катодов) металл-ионных аккумуляторов, определено место никеля среди других 3d-металлов, используемых в индустрии электрохимического накопления энергии. Приведены основные методы и подходы к синтезу текущего и следующего поколений катодных материалов на основе слоистых никельсодержащих оксидов. Кристаллическая и электронная структуры этих материалов, в том числе их эволюция в процессе (де)интеркаляции катионов щелочного металла, рассмотрены в контексте изменения электрохимических свойств. Обсуждены наиболее острые проблемы, стоящие перед современным материаловедением на пути к коммерциализации и промышленному производству высокочемических никельсодержащих катодных материалов нового поколения. Обозначены перспективные направления дальнейшей разработки таких материалов.

Библиография — 252 ссылки.

**Ключевые слова:** никель, 3d-металлы, металл-ионный аккумулятор, катод, Ni-обогащенные слоистые оксиды, теория кристаллического поля, теория функционала плотности, эффект Яна–Теллера, индуктивный эффект, фазовые переходы, катионная миграция, соосаждение.

key component of future energy

28  
**Ni**  
Nickel

- suitable redox potential
- low toxicity
- structure stability
- moderate reserve
- two-electron redox

### Оглавление

1. Введение	2	4.2. Эффект Яна–Теллера в структурах никельсодержащих слоистых оксидов	12
2. Требования к материалам положительных электродов металл-ионных аккумуляторов	4	4.3. Электронная и кристаллическая структуры никельсодержащих слоистых оксидов в процессе электрохимического циклирования	14
3. Место никеля среди переходных 3d-металлов, используемых для создания катодных материалов	6	4.3.1. Эволюция электронной структуры	14
3.1. Положение никеля в ряду переходных 3d-металлов	6	4.3.2. Фазовые переходы в слоистых оксидах $A\text{NiO}_2$ ( $A = \text{Li}, \text{Na}$ )	16
3.2. Особенности электронного строения катионов 3d-металлов в рамках теории кристаллического поля	6	4.3.3. Миграция катионов переходных металлов и выделение кислорода	18
3.3. Основные особенности электронной структуры никельсодержащих катодных материалов	7	4.4. Химическое модифицирование слоистых оксидов, обогащенных никелем	19
3.4. Редокс-потенциалы катодных материалов на основе переходных 3d-металлов	9	4.5. Синтез никельсодержащих слоистых катодных материалов	21
4. Катодные материалы на основе никельсодержащих слоистых оксидов для металл-ионных аккумуляторов	11	5. Заключение	26
4.1. Кристаллическая структура никельсодержащих слоистых оксидов	11	6. Список сокращений	28
		7. Литература	28

# Направления разработки катодных материалов

Параметр	Значение	Важно для:	Зависит от:
Внешний вид	Пепельно-черный порошок	← однородность	химическая гомогенность пористость агломератов количество структурных дефектов
Удельная разрядная емкость, при токах заряда/разряда 0.1С/0.1С, мАч/г, не менее	180	← удельная энергия	
Удельная разрядная емкость, при токах заряда/разряда 0.5С/0.5С, мАч/г, не менее	160	← скорость заряда/разряда	пористость агломератов размер первичных частиц распределение по размерам форма агломератов (сферичность)
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г, в пределах	0.3–2.5	← кулоновская эффективность деградация	
Плотность утряски, г/см <sup>3</sup> , в пределах	2.1–2.5	← плотность энергии	
Распределение размеров частиц:			распределение по размерам агломератов
-D <sub>10</sub>	≥ 5 мкм;	← однородность электродной смеси	
-D <sub>50</sub>	9 - 15 мкм;	← дефектность электродного слоя	
-D <sub>90</sub>	≤ 25 мкм;		
-D <sub>макс</sub>	≤ 50 мкм		
Идентификация порошка рентгенофазовым анализом	Соответствие PDF-4 #056-0147 с отклонением в объеме элементарной ячейки не выше 1%.	← наличие примесей	элементный состав содержание посторонних элементов содержание кислорода
Содержание влаги, вес.%, не более	0.2	← смешиваемость с неводным растворителем деградация	контакт с воздухом качество упаковки условия хранения
pH водной вытяжки, не более	11.7	← пассивация, коррозия Al	остаточный LiOH
Деградация удельной емкости за 300 циклов, %, не более	15	← циклический ресурс	множество факторов

# Направления разработки катодных материалов

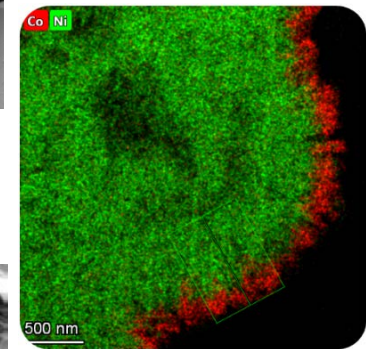
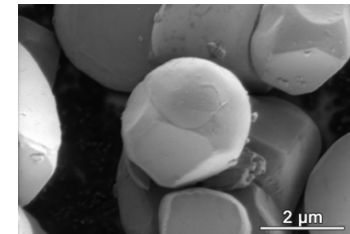
## Цели:

- увеличение циклического ресурса
- повышение плотности утряски
- повышение мощностных характеристик

## 1. “Монокристаллические” высоконикелевые NMC

- меньше взаимодействие с электролитом
- выше трещиностойкость
- выше плотность утряски (до 3.0 г/см<sup>3</sup>)

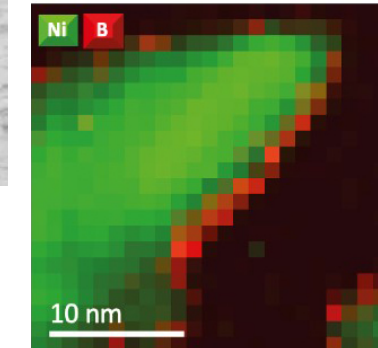
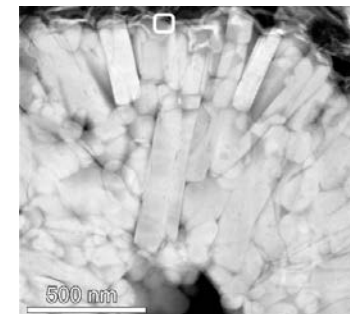
пКАМ  
КАМ



## 2. Структуры “ядро-оболочка” и градиентные структуры

- менее реакционноспособны по отношению к электролиту

пКАМ  
КАМ



## 3. Структуры с радиальным распределением частиц

- лучше транспорт Li<sup>+</sup>
- выше трещиностойкость

пКАМ  
КАМ

## 4. Модификация межзеренных границ

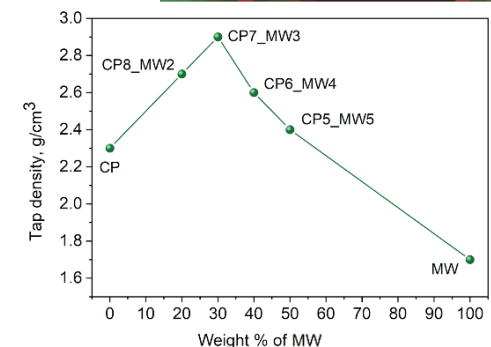
- меньше взаимодействие с электролитом
- выше трещиностойкость
- лучше транспорт Li<sup>+</sup>

пКАМ  
КАМ

## 5. Мультимодальные смеси

- выше плотность утряски

пКАМ  
КАМ



# Направления разработки катодных материалов

---

## Патенты в области катодных материалов NMC

1. Абакумов А.М., Савина А.А., Орлова Е.Д., Композитный катодный материал на основе слоистых оксидов переходных металлов для литий-ионных аккумуляторов и его соединения-предшественники, RU 2 748 762, 11.12.2020.
2. Абакумов А.М., Савина А.А., Моисеев И.А., Павлова А.Д. Катодный материал с высокой плотностью энергии для литий-ионных аккумуляторов, RU 2 776 156, 14.07.2022.
3. Абакумов А.М., Савина А.А., Орлова Е.Д., Скворцова И. Добавка к активному катодному материалу для литий-ионных аккумуляторов, способ ее получения и активный катодный композитный материал, содержащий добавку, RU 2 791 251, 06.03.2023.
4. Абакумов А.М., Савина А.А., Ситникова Л.А., Должикова Е.А., Активный катодный материал на основе слоистых оксидов лития и переходных металлов для литий-ионных аккумуляторов, способ его получения и его соединение-предшественник, заявка № 2024107159, 19.03.2024.

---

**Спасибо за внимание!**