

# Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 541.136

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31303>



П.А. Новиков  , Г.В. Цветкова, А.А. Попович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

 [novikov\\_pa@spbstu.ru](mailto:novikov_pa@spbstu.ru)

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ДОБАВОК В ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЯХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ВЫСОКОМОЩНЫХ УСТРОЙСТВАХ

*Аннотация.* В данной работе проведено сравнительное исследование эффективности различных проводящих добавок в катодных электродах литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) на основе коммерческого материала  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  (NCM523). В качестве проводящих компонентов были изучены: технический углерод Super P, полимер PEDOT:PSS и углеродные нанотрубки (УН). Исследование включало оценку морфологии электродов, зарядно-разрядных характеристик, циклической стабильности, импедансной спектроскопии и циклической вольтамперометрии. В ходе анализа полученных результатов было выяснено, что добавки УН обеспечивают наилучшие электрохимические параметры, включая минимальную поляризацию, высокую удельную емкость и стабильность при высоких токах. Добавка PEDOT:PSS продемонстрировала характеристики, потенциально интересные для применения в высокомоощных ЛИА, но подготовка образцов требует оптимизации условий приготовления.

*Ключевые слова:* литий-ионные аккумуляторы, токопроводящие добавки, высокомоощные аккумуляторы, катодные материалы.

*Благодарности:* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Соглашение № 075-15-2025-210 от 04.04.2025).

*Для цитирования:*

Новиков П.А., Цветкова Г.В., Попович А.А. Оценка эффективности различных проводящих добавок в литий-ионных батареях для применения в высокомоощных устройствах // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 3. С. 45–59. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31303>



P.A. Novikov ✉, G.V. Tsvetkova, A.A. Popovich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ novikov\_pa@spbstu.ru

## EFFECTIVENESS EVALUATION OF VARIOUS CONDUCTIVE ADDITIVES IN LITHIUM-ION BATTERIES FOR USE IN HIGH-POWER DEVICES

**Abstract.** This work presents a comparative study of the effectiveness of various conductive additives in cathode electrodes of lithium-ion batteries based on the commercial  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  (NCM523) material. The following conductive components were studied: Super P carbon black, polymer PEDOT:PSS and carbon nanotubes (CNTs). The study involved the evaluation of electrode morphology, charge-discharge characteristics, cyclic stability, impedance spectroscopy and cyclic voltammetry. Analysis of the obtained results revealed that the CNT additives provide the best electrochemical parameters, including minimal polarization, high specific capacitance and stability at high currents. PEDOT:PSS additive demonstrated characteristics that are potentially promising for application in high-power lithium-ion batteries, but the sample preparation process requires optimization of the synthesis conditions.

**Keywords:** lithium-ion batteries, conductive additives, high-power batteries, cathode materials.

**Acknowledgements:** The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the strategic academic leadership program “Priority 2030” (Agreement No. 075-15-2025-210 dated 04.04.2025).

**Citation:**

Novikov P.A., Tsvetkova G.V., Popovich A.A., Effectiveness evaluation of various conductive additives in lithium-ion batteries for use in high-power devices, *Global Energy*, 31 (03) (2025) 45–59, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31303>

**Введение.** Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) за несколько десятилетий своего развития стали неотъемлемой частью современной жизни. Их появление дало мощный толчок к технологическому прогрессу в области мобильной электроники и электротранспорта, сыграв ключевую роль в переходе от машин, работающих на топливе, к экологичным электромобилям.

Несмотря на то, что история ЛИА насчитывает уже около 50 лет, потенциал многих катодных материалов до сих пор не реализован в полной мере. Однако постоянное совершенствование технологий и разработка новых материалов открывают новые горизонты для улучшения характеристик аккумуляторов. В первую очередь потребителей интересуют такие параметры, как удельная мощность и энергоемкость, которые напрямую зависят от конструкции батарей.

Для повышения эффективности аккумуляторов на литий-ионной системе на сегодняшний день были предприняты такие разработки, как создание принципиально новых активных материалов, включая обогащенные литием соединения, такие как силикат железа-лития и оксид ванадия, а также создание альтернативных натрий- и калий-ионных аккумуляторов следующего поколения [1–8]. Помимо этого были предприняты попытки по улучшению уже широко используемых компонентов, внедрение передовых методик [9, 10], а также работа над повышением эффективности вспомогательных элементов, таких как электролиты [11], токосъемники [12], сепараторы и проводящие добавки [13–15].

Современные исследования в области ЛИА сосредоточены на поиске способов повышения их эффективности, и в этом направлении выделяются два ключевых подхода.

Один из них связан с использованием аддитивных технологий, которые позволяют совершенствовать конструкцию аккумуляторов, сокращая количество вспомогательных элементов, снижающих удельную энергию [16, 17]. Другой подход направлен на изменение структуры электродов, а именно – на увеличение их толщины. Хотя этот метод способствует снижению затрат и повышению энергетической плотности, он также приводит к значительному падению удельной мощности аккумулятора [18–21].

Еще один вариант повышения эффективности ЛИА – оптимизация состава электродов путем уменьшения доли связующих веществ и проводящих добавок [22]. Такой подход позволяет увеличить удельную энергию батарей, не ухудшая их ключевых характеристик. В стандартных катодных суспензиях аккумуляторов обычно содержатся три компонента: активный материал (60–95%), связующее вещество (2–25%) и проводящие добавки (3–30%). Для высокомоощных аккумуляторов наиболее распространенным является соотношение 80%:10%:10% [23]. Исследования показывают, что наилучшие результаты достигаются при содержании активного материала на уровне 90%, а связующего вещества и проводящих добавок – в диапазоне от 2% до 8% [24]. Однако точное соотношение компонентов зависит от конкретного типа аккумулятора и условий его эксплуатации.

В настоящее время ученые активно изучают новые проводящие добавки, такие как углеродные нанотрубки (УН), графен и электропроводные полимеры [25–28]. Эти материалы позволяют повысить содержание активного компонента в составе электрода без ухудшения его проводящих свойств. Однако, поскольку в разных исследованиях используются различные катодные материалы, рабочие напряжения и соотношения компонентов, сложно однозначно определить, какие добавки являются наиболее эффективными.

В данной работе рассматривается эффективность различных функциональных добавок в составе катодной суспензии, основанной на коммерчески доступном активном материале  $\text{LiNi}_{0,5}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{0,3}\text{O}_2$ . В качестве проводящих компонентов исследуются органический полимер PEDOT:PSS (поли(3,4-этилендиокситиофен)-поли(стиролсульфонат)) и УН. Их свойства сравниваются с традиционной проводящей добавкой – нанодисперсным техническим углеродом (carbon black).

Полимер PEDOT:PSS представляет собой проводящий материал р-типа, который отличается хорошей электропроводностью, стабильностью и высокой электрохимической активностью в широком диапазоне рабочих потенциалов. Он уже используется в производстве электропроводных покрытий и становится объектом лабораторных исследований в сфере ЛИА. УН, обладая выдающимися механическими, химическими и электрическими свойствами, широко применяются в создании различных электронных устройств.

### Материалы и методы

В настоящем исследовании в качестве активного материала положительного электрода был выбран литий-никель-кобальт-марганцевый оксид с мольным соотношением переходных металлов 5:2:3 (NCM523), широко применяемый в ЛИА. Электролит представляет собой 1М раствор соли гексафторфосфата лития, растворенный в равных объемных долях этиленкарбоната, диметилкарбоната и диэтилкарбоната. Все реагенты и материалы, включая компоненты электролита, приобретались у отечественных производителей.

Целью данной работы стало сравнение эффективности трех типов электропроводящих добавок в катодных смесях: проводящего полимерного связующего PEDOT:PSS, традиционно используемой углеродной токопроводящей добавки наполнителя Super P, а также УН. Составы катодных смесей и массовые доли компонентов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Составы образцов катодных смесей

Table 1

Compositions of samples of cathode mixtures

Образец	Массовая доля NCM, %	Массовая доля токопроводящей добавки, %	Массовая доля PVDF, %	Массовая доля др. компонентов, %
PEDOT:PSS	92	2% PEDOT + 4% Super P	–	2% карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ)
Super P <sub>(H)</sub>	91	4 % Super P	5	–
Super P <sub>(B)</sub>	80	10 % Super P	10	–
УН <sub>(H)</sub>	91	1% УН + 3% Super P	5	–
УН <sub>(B)</sub>	76	4% УН	20	–

Приготовление катодных суспензий производилось в агатовой ступке непрерывным перемешиванием в течение 15 минут. В качестве растворителя для связующего PVDF использовался N-метилпирролидон. Полученные суспензии наносились на алюминиевую фольгу, выступающую в роли токоснимателя, и затем сушились при температуре 95°C в течение 24 часов в вакуумной сушильной камере.

Электрохимические характеристики материалов исследовались с использованием испытательных макетов типа CR2032. В качестве противоэлектрода использовалась литиевая фольга диаметром 16 мм, сепаратором служила полипропиленовая мембрана Celgard. Сборка элементов производилась в инертной атмосфере аргона в перчаточном боксе.

Гальваностатические циклы заряда-разряда выполнялись с использованием оборудования Neware BTS CT-3008-5V10mA в диапазоне напряжений 2,7–4,2 В (относительно Li/Li<sup>+</sup>) при плотностях тока от 0,1 до 10 С. Импедансные спектры снимались с помощью установок Parstat 4000+ и Solartron 1280 в диапазоне частот 100 кГц – 0,02 Гц при амплитуде 5 мВ. Циклическая вольтамперометрия проводилась со скоростью сканирования 20–50 мкВ/с в потенциале от 3 до 4,2 В. Морфология электродов анализировалась с использованием сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Merlin.

**Результаты и обсуждение**

Морфология исходного катодного материала без токопроводящих добавок, а также образцов УН<sub>(B)</sub>, PEDOT:PSS и Super P<sub>(H)</sub> была проанализирована методом сканирующей электронной микроскопии. Микрофотографии продемонстрированы на рис. 1. Исходный порошок NCM523 демонстрирует относительно однородную морфологию частиц сферической и полисфероидальной формы с хорошо выраженной гранулярной структурой. Частицы имеют размеры порядка нескольких микрон с плотной поверхностью и четко очерченными границами. Такая морфология указывает на минимальную агрегацию и хорошую первичную дисперсность. Образец с добавлением Super P (рис. 1а) показывает формирование более разветвленной и неоднородной структуры. Поверхность частиц становится менее четкой, наблюдается значительное количество мелкодисперсного материала на фоне, что свидетельствует о покрытии активных частиц углеродным наноматериалом. Такая структура способствует улучшению электронной проводимости за счет образования проводящей сетки. Поверхность образца, модифицированного проводящим полимером PEDOT:PSS, приобретает более гладкий и слоистый вид. Хорошо

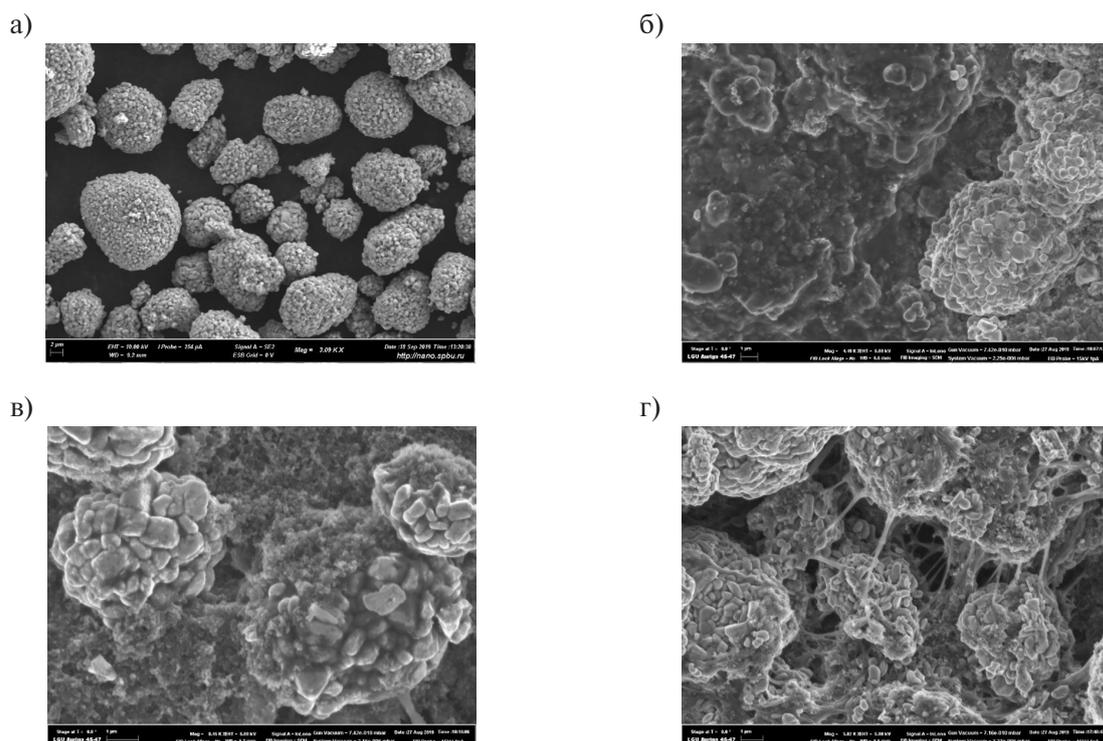


Рис. 1. СЭМ-изображения исходного порошка NCM523 (а), образца с добавкой Super P(в) (б), образца PEDOT:PSS (в), образца с низким содержанием УН (г)

Fig. 1. SEM images of initial NCM523 powder (a), sample with Super P(h) additive (b), PEDOT:PSS sample (c) and sample with CNT(l) (d)

заметны скопления чешуйчатых агрегатов, обволакивающих первичные частицы. Подобная морфология указывает на равномерное распределение полимерной фазы, что может улучшить механическую стабильность и электронную проводимость при циклировании. Образец с низким содержанием углеродного наноматериала УН<sub>(н)</sub> характеризуется выраженной пористостью и наличием развитой сети волоконистых структур. Наблюдается слабая агломерация углеродных волокон и частиц активного материала. Такая морфология может указывать на неравномерное распределение компонентов в электроде, что потенциально снижает эффективность транспорта электронов и ионов.

Зарядно-разрядные кривые всех образцов на 5-м цикле в диапазоне напряжений от 2,7 до 4,2 В при скорости 0,2С продемонстрированы на рис. 2а. Удельная разрядная емкость у всех образцов, кроме PEDOT, составляет около 150 мАч/г. В свою очередь, емкость при разряде у PEDOT образца меньше 0 142 мАч/г. Результаты исследования методами оптической и электронной микроскопии объясняют это явление тем, что поверхность электрода PEDOT не всегда однородна, некоторые частицы NCM могут не быть полностью покрыты связующим. Вероятно, это могло повлиять на локальное отслоение электрода либо электроизоляции и, в свою очередь, неэффективное использование всей активной массы, что и объясняет более низкие емкостные характеристики по сравнению с остальными образцами. Образец УН<sub>(н)</sub> демонстрирует самое высокое среднеразрядное напряжение – 3,8 В, а образец Super P<sub>(н)</sub> – самое низкое – 3,67 В. Анализ зарядно-разрядных кривых двух образцов с добавками из углеродного нановолокна дал понять, что данные образцы демонстрируют наименьшие значения внутреннего омического сопротивления и чуть более высокие значения удельной разрядной емкости. На рис. 2б отобраны дифференцированные графики емкости, полученные после сглаживания исходных

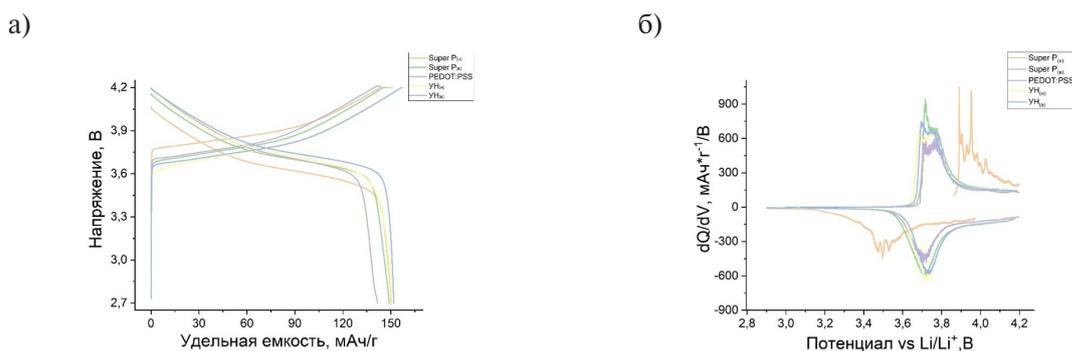


Рис. 2. Зарядно-разрядные кривые на всех образцах на 5-м цикле (а), графики дифференцированной емкости (б)  
 Fig. 2. Charge-discharge curves of all samples in cycle 5 (a), graphs of differentiated capacity (b)

потенциальных кривых. Становится очевидным, что пики емкости при процессах заряда и разряда у образцов PEDOT:PSS, Super P<sub>(в)</sub>, УН<sub>(в)</sub> и УН<sub>(н)</sub> расположены примерно в одинаковых областях потенциала. Зарядные пики расположены в области 3,7–3,8 В, наличие которых объясняется многофазовыми переходами Ni<sup>2+</sup>/Ni<sup>3+</sup> и Ni<sup>3+</sup>/Ni<sup>4+</sup>. Дифференцированная кривая образца Super P<sub>(н)</sub> значительно отличается от вышеописанных. Окислительный пик смещен в сторону более высоких потенциалов, а восстановительный, наоборот, в сторону более низких. Высокие значения внутреннего сопротивления как раз являются причиной такого явления, вероятно, из-за недостаточного количества токопроводящей добавки.

Были исследованы циклический ресурс при скоростях заряда/разряда 0,5 С и в диапазоне напряжений 2,7–4,2 В и стабильность при токовой нагрузке в диапазонах скоростей от 0,2 до 10 С (зарядные скорости постоянны при 0,2 С). Результаты представлены на рис. 3. При анализе результатов можно сделать вывод, что образец Super P<sub>(н)</sub> показывает наихудшие характеристики. Начальная емкость у данного образца – 131 мАч/г, после 100 циклов – 102 мАч/г, что говорит о потере 22% емкости. Также при исследовании поведения при различной токовой нагрузке Super P<sub>(н)</sub> показывает сильное падение до нулевой емкости при разряде со скоростями свыше 1 С. В свою очередь, у образца с высоким содержанием сажи результаты исследования электрохимического поведения более удачны, при циклировании в ход 100 циклов потеря емкости составила 9,5%, также стабильно поведение при испытаниях с различной токовой нагрузкой. Стоит отметить, что данный образец при скорости разряда 5 С показывает близкие емкостные характеристики к образцам PEDOT:PSS и УН<sub>(н)</sub>, УН<sub>(в)</sub>. Образец PEDOT:PSS демонстрирует циклический ресурс близкий к образцу Super P<sub>(н)</sub>, но с чуть более удачными емкостными характеристиками: 135 мАч/г против 110 мАч/г после 100 циклов с потерей емкости 18%. Циклическая стабильность данной токопроводящей добавки хуже, чем ранее рассмотренные для материалов типа LFP и LMO [28, 29], и, более того, удельные емкостные характеристики самые малые по сравнению с результатами других образцов, полученных при малых токах 0,2–0,5 С. Такое поведение, вероятно, можно объяснить тем, что добавка PEDOT:PSS используется с водным растворителем, который склонен производит ОН-группы на активных частицах и приводит к дезориентации во время электрохимических испытаний. Положительное влияние токопроводящей добавки PEDOT:PSS становится очевидным при более высоких токах, когда емкостные характеристики демонстрируют 100 мАч/г при 5 С и 60 мАч/г при 10 С, по сравнению с образцом Super P<sub>(н)</sub>, который имеет схожее отношение активного материала к неактивному.

Образцы с токопроводящей добавкой УН демонстрируют наилучшие результаты. УН<sub>(н)</sub> имеет хорошую стабильность при циклировании, 143 мАч/г – начальная емкость и 125 мАч/г – после 100 циклов, потеря емкости составила 13%. Также у данного образца наивысшее значение

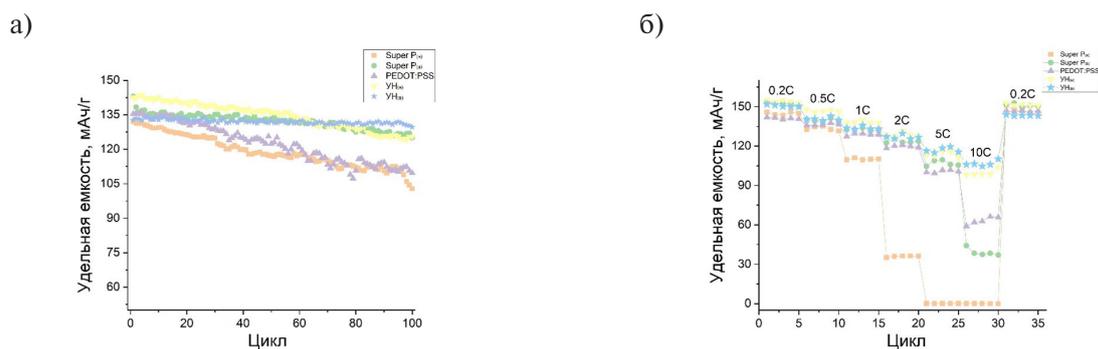


Рис. 3. Циклический ресурс образцов (а), исследование различной токовой нагрузки (б)

Fig. 3. Cyclic life of samples (a), investigation of various current loads (b)

удельной разрядной емкости при тестировании высокими токами – 100 мАч/г при 10С. УН<sub>(в)</sub> добавка продемонстрировала начальную емкость 132 мАч/г и после 100 циклов 130 мАч/г, таким образом показав отличную стабильность и потерю емкости в 1,5%. Помимо этого, данный образец имеет наилучшие показатели при исследовании токовой нагрузкой, удельная разрядная емкость при 10 С – 105–110 мАч/г. Коллектив исследователей продемонстрировал в своей публикации [14], что катодный материал NCM523 с добавкой из УН в количестве 5 мас.% при заряде до потенциала 4,8 В может достигнуть значения удельной емкости 260 мАч/г, что является близким к теоретическому значению [30]. Другая группа авторов [31] описала работу суспензии, состоящей из NCM523 и УН без дополнительного связующего вещества, которая продемонстрировала многообещающие электрохимические характеристики. Также данная группа исследовала другой состав суспензии с УН и полиакриловой кислотой в качестве связующего, которая позволяет улучшить адгезию с токоснимателем и предотвратить расслаивание и растрескивание электрода. Но, несмотря на эти преимущества, отсутствие электронной и ионной проводимости отрицательно влияет на кинетику реакций и, следовательно, приводит к снижению удельной емкости при высоких токах. Тем не менее в наших экспериментах образцы с УН и связующим PVDF демонстрируют более стабильное поведение, что позволяет нам сделать вывод, что суспензия с PVDF в качестве связующего обладает более перспективными характеристиками.

Данные образцы были также изучены методом циклической вольтамперометрии (ЦВА), который применяется для исследования электрохимической кинетики, но в нашем случае позволил изучить поведение каждой токопроводящей добавки. Существует несколько типичных диапазонов скоростей съемки поляризационных кривых, при которых изучается различная кинетика ЛИА. ЦВА при скоростях съемки порядка 100 мкВ/с позволяет изучить кинетические ограничения, такие как реакция переноса заряда и процесс переноса ионов лития через поверхностные пленки. Твердофазная диффузия ионов лития через материалы катода/анода может быть исследована средними скоростями съемки между десятками и сотнями милливольт в секунду. Характеристики поляризационных кривых в области от единиц до десятка милливольт в секунду позволяет подробно изучить стадии интеркаляции и фазовые переходы. Измерения ЦВА с низкой скоростью сканирования могут отражать накопление лития, близкое к равновесному, не поддающееся контролю диффузии, и дать дополнительное представление о кинетике процессов интеркаляции.

В наших исследованиях были использованы скорости сканирования 20, 30, 40 и 50 мкВ/с в диапазоне потенциалов от 3 до 4,2 В за исключением образца PEDOT:PSS, так как его потенциал отсечки равен 4,3 В, кривые представлены на рис. 4. Результаты данных измерений отражают

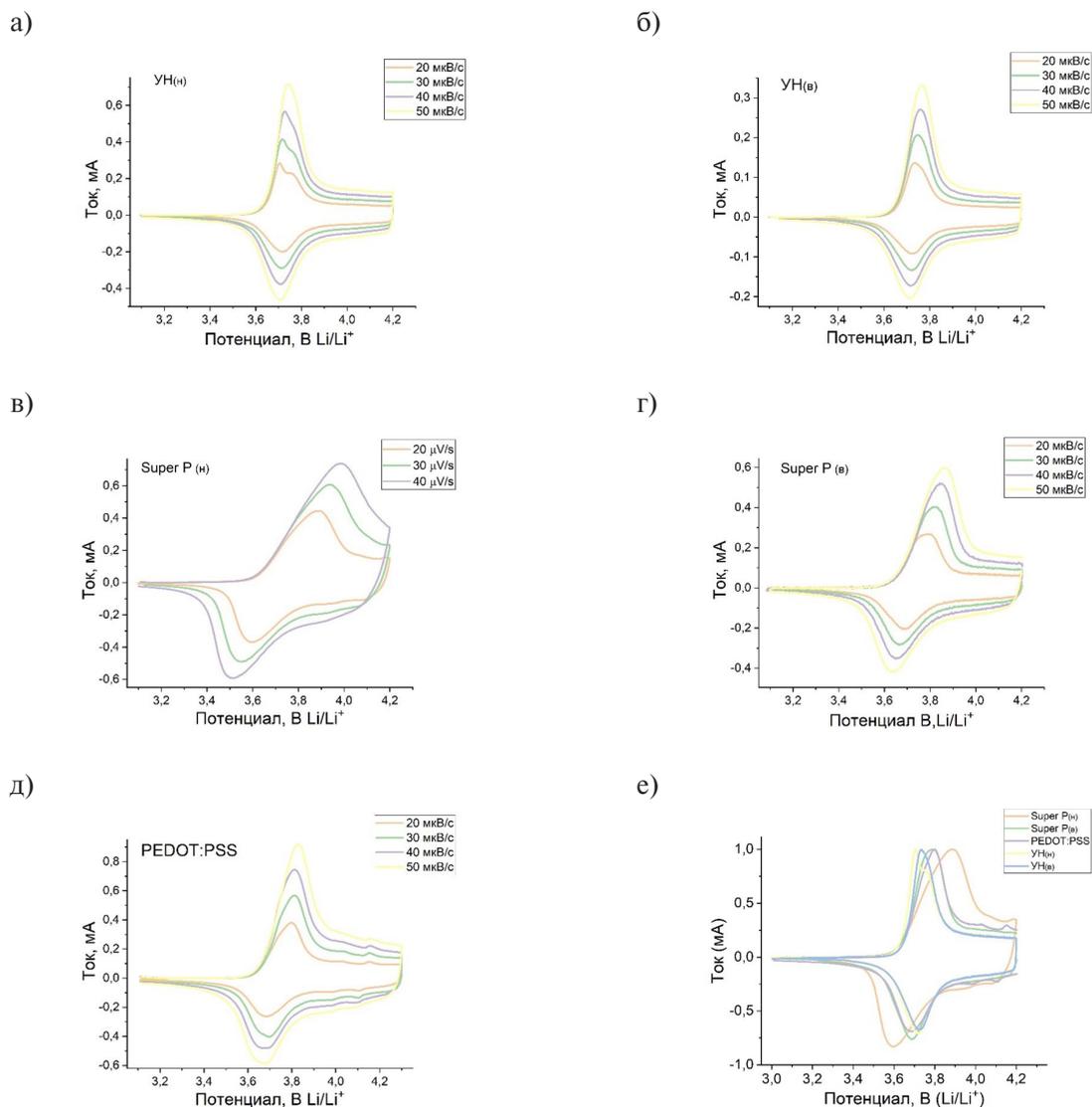


Рис. 4. Кривые ЦВА для всех образцов (а–д), сравнительный график (е)

Fig. 4. CV curves for all samples (a–e), comparative graph (f)

характеристики твердофазной диффузии ионов лития, стадии интеркаляции и, вероятно, фазовые переходы. Все исследованные образцы имели один основной анодный пик и катодный пик, которые ассоциируются с окислительно-восстановительными реакциями атомов никеля в тройном литированном оксиде в диапазоне напряжений от 2,7 до 4,2 В. Электрохимическое поведение подготовленных электродов может подвергнуться сравнению с использованием разницы потенциалов, также известной как поляризация,  $\Delta E (E_{ox} - E_{red})$ , между процессом изъятия и внедрения ионов лития. Оба электрода с добавкой из УН продемонстрировали наименьшие значения поляризации, около 10 мВ при скорости 20 мкВ/с, обратимость ОВР и, как следствие, наилучшую работу при различных токовых нагрузках, что было рассмотрено ранее.  $\Delta E = 53$  мВ при скорости 50 мкВ/с для образцов с УН, что на 50% лучше, чем было представлено для NCM523 [14]. Образцы с добавкой PEDOT:PSS и Super P<sub>(н)</sub> показали средние значения поляризации в 100 мВ, что практически совпадает с ранее опубликованными результатами с 10% сажи в качестве токопроводящей добавки [32] и PEDOT:PSS [29]. Наибольшее значение поляризации, около 300 мВ при скорости сканирования в 20 мкВ/с, было получено для образца

Super P<sub>(н)</sub>, что подтверждает наихудшие показатели электрохимического поведения. Также был отмечен сдвиг потенциалов катодного пика на 20 мВ для образцов УН и PEDOT:PSS, на 50 мВ для Super P<sub>(в)</sub> и на 100 мВ для образца Super P<sub>(н)</sub> с увеличением скорости сканирования (табл. 2). Таким образом, можно сделать вывод, что электроды с токопроводящей добавкой из УН обладают улучшенными значениями диффузионной кинетики ионов лития и более низкими значениями поляризации электродов, что необходимо при высоко мощностных применениях ЛИА.

Таблица 2

## Сравнение свойств токопроводящих добавок

Table 2

## Comparison of properties of conductive additives

Образец	$\Delta E$ при 20 мкВ/с, мВ	Сдвиг потенциала, мВ	Коэффициент эффективной диффузии ( $10^{10}$ см <sup>2</sup> /с)
Super P <sub>(н)</sub>	292	105	4,3
Super P <sub>(в)</sub>	102	53	14
PEDOT:PSS	109	17	12
УН <sub>(н)</sub>	11	20	30
УН <sub>(в)</sub>	12	22	18

Интеркаляция лития является многостадийным процессом, который включает в себя миграцию Li<sup>+</sup> сквозь поверхностные слои, перенос заряда через интерфазу, твердотельную диффузию в активную массу и, наконец, накопление лития в основной массе. Данные процессы имеют характерные постоянные времени и могут быть изучены методом спектроскопии электрохимического импеданса. На рис. 5 представлены диаграммы Найквиста, полученные из всех образцов при трех потенциалах: 2,7 В – полностью разряженное состояние, 3,8 В – степень заряженности 50%, 4,2 В – полный заряд. Эквивалентная схема представлена на рис. 5г. Она включает в себя несколько схем RC, которые отображают миграцию ионов лития через поверхностные пленки, сопротивление переносу заряда R<sub>CT</sub>, связанное с емкостью двойного слоя C<sub>DL</sub>, конечный либо бесконечно длинный элемент типа Варбурга для твердотельной диффузии лития и, наконец, емкость интеркаляции. Параметры данных электрических элементов используются для сравнения и анализа поведения аккумулятора. Сопротивление переносу заряда и емкость интеркаляции являются величинами, зависящими от потенциала во время процесса заряда/разряда. R<sub>CT</sub> и C<sub>DL</sub> часто ассоциируются с интерфазой между поверхностными пленками SEI (твердая электролитная интерфаза) и активными катодными и анодными материалами. Кривые импеданса, полученные в данном анализе, представляют собой один сжатый полукруг в области средних частот, которые можно отнести к сопротивлению переноса заряда. В образцах Super P<sub>(в)</sub> и Super P<sub>(н)</sub> сопротивление переносу заряда намного больше (100–200 Ом), чем в образцах с добавками PEDOT:PSS и УН в различном процентном соотношении, где данное сопротивление составляло 30–40 Ом. Это говорит о том, что высокочастотные характеристики подавлены в образцах с сажей в качестве токопроводящей добавки. Сопротивление поверхностной пленки для образца с добавкой PEDOT:PSS составило порядка 25 Ом, для УН<sub>(н)</sub> и УН<sub>(в)</sub> – 4–8 Ом. Сопротивление поверхностной пленки у образца PEDOT:PSS выше, вероятно, из-за того факта, что добавка полностью обволокла частицы NCM523, либо из-за групп О-Н на поверхности, которые поспособствовали появлению дополнительного сопротивления SEI. Микрофотографии

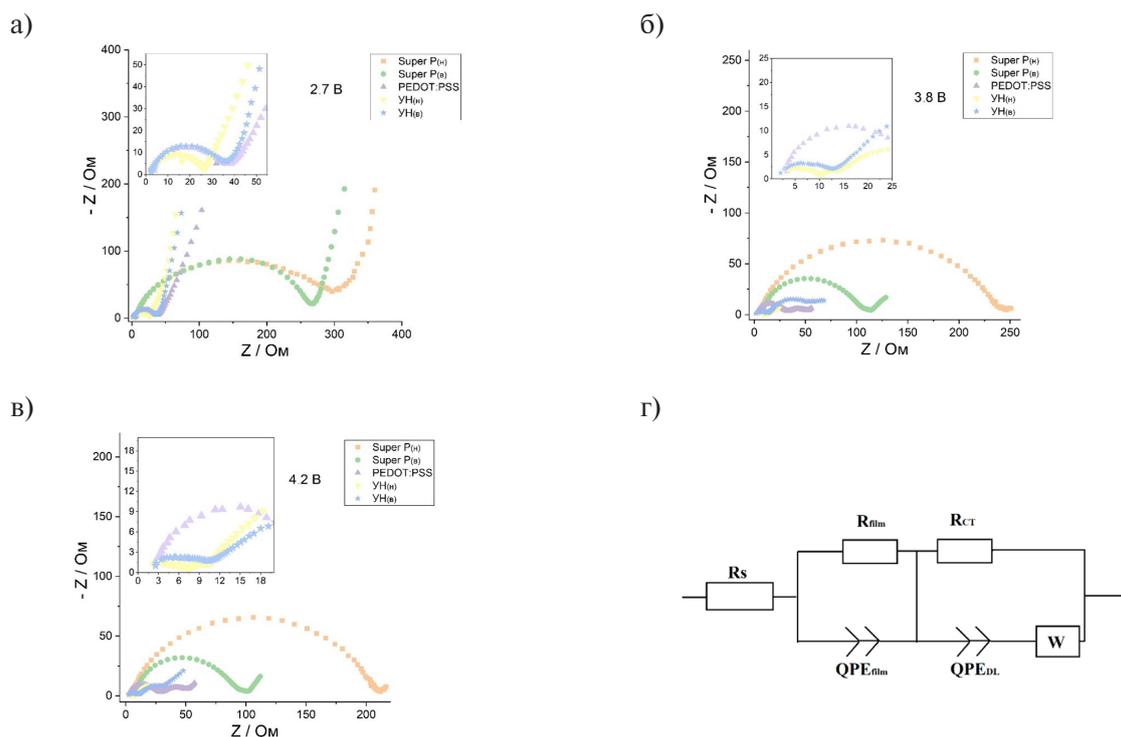


Рис. 5. Диаграммы Найквиста в разных степенях заряженности (а–в), эквивалентная схема (г)  
 Fig. 5. Nyquist plots in different degrees of charge (a–c), equivalent circuit (d)

образцов с сажей и УН выглядят рассыпчато и не покрывают полностью частицы NCM в сравнении с PEDOT:PSS, что, возможно, является причиной низкого сопротивления поверхностной пленки. Полученные данные спектроскопии электрохимического импеданса образцов с добавками УН и PEDOT:PSS коррелируют с высоким разрядным напряжением и, соответственно, с низким внутренним сопротивлением аккумуляторов.

### Выводы

Три вида токопроводящих добавок: классическая сажа, полимерное связующее PEDOT:PSS и УН – были проанализированы и сравнены между собой в контексте влияния на электрохимическое поведение в связке с тройным литированным оксидом переходных металлов NCM523. Образцы с классической сажей продемонстрировали типичное поведение, в частности, можно сделать вывод, что Super P<sub>(a)</sub> не пригоден для высокомоощных применений. В свою очередь, образец Super P<sub>(b)</sub> возможно применять при токах не выше 5С. Образец со связующим PEDOT:PSS не продемонстрировал заметного улучшения характеристик, но, вероятно, необходимо доработать метод приготовления электродных суспензий для улучшения электрохимии, а также не использовать водный раствор данной добавки. Образцы с УН имеют наилучшие значения емкости при токах 5 С и 10 С, анализ методом ЦВА продемонстрировал, что коэффициент эффективной диффузии у данных образцов в 2–7 раз больше. Результаты спектроскопии электрохимического импеданса показали, что значительное уменьшение сопротивления переноса заряда наблюдается у образцов с добавками PEDOT:PSS и УН. Традиционное соотношение намазки 80:10:10 для активного материала, токопроводящей добавки и связующего вещества показало классическое поведение в ЛИА, но, в целом, количество активного материала может быть вполне увеличено на 10–12% при использовании таких токопроводящих добавок, как PEDOT:PSS и УН, с соответствующим увеличением удельных емкостных характеристик. Таким образом, данным

исследованием нам удалось продемонстрировать, что использование токопроводящих добавок с УН максимально совместимо и перспективно для использования в высокомоощных ЛИА без потери высоких значений удельной емкости.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Hendri Y.B., Wu Y.-S., Wu S.-H., Kuo L.-Y., Chang J.-K., Amri A., Jose R., Yang C.-C.** Unlocking the synergistic effects of gradient engineering, Mg doping, and in situ Li conductive coating for high-performance Ni-rich  $\text{LiNi}_{0.92}\text{Co}_{0.04}\text{Mn}_{0.04}\text{O}_2$  cathode materials, *Journal of Materials Chemistry A*, 13 (29) (2025) 23902–23927. DOI: 10.1039/D5TA02551F
- [2] **Zeng J., Shen Y., Ren X., Li X., Sun Y., Zhang G., Wu Z., Zhu S., Hai C., Zhou Y.** F-doped Ni-rich layered cathode material with improved rate performance for lithium-ion batteries, *Processes*, 10 (8) (2022) 1573. DOI: 10.3390/pr10081573
- [3] **Sivaraj P., Abhilash K.P., Nalini B., Selvin P.C., Goel S., Yadav S.K.** Insight into cations substitution on structural and electrochemical properties of nanostructured  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$  cathodes, *Journal of the American Ceramic Society*, 103 (3) (2020) 1685–1697. DOI: 10.1111/jace.16805
- [4] **Wang J.N., Li Z.Q., Zhu Y.Z., Liang Y., Cui Y., Tao H.L., Song B., Nikiforov A., Zhang Z.H.** Effects of doping on electronic structure and ion diffusion of  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ , *Journal of the American Ceramic Society*, 107 (1) (2024) 344–354. DOI: 10.1111/jace.19461
- [5] **Uxa D., Holmes H.J., Meyer K., Dörrerac L., Schmidt H.** Lithium tracer diffusion in  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$  cathode material for lithium-ion batteries, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23 (10) (2021) 5992–5998. DOI: 10.1039/D0CP05593J
- [6] **Dewan M., Majumder T., Majumder S.B.** Electrophoretically deposited bismuth iron oxide as dual role anode material for both lithium and sodium-ion batteries, *Materials Today Communications*, 27 (2021) 102358. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102358
- [7] **Nitta N., Wu F., Lee J.T., Yushin G.** Li-ion battery materials: present and future, *Materials Today*, 18 (5) (2015) 252–264. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040
- [8] **Sun B., Mao S., Zhu S., Zhou G., Xia Y., Zhao Y.** Improved rate and cycling performances of electrodes based on  $\text{BiFeO}_3$  nanoflakes by compositing with organic pectin for advanced rechargeable Na-ion batteries, *ACS Applied Nano Materials*, 1 (3) (2018) 1291–1299. DOI: 10.1021/acsanm.8b00011
- [9] **Nazarov D.V., Maximov M.Yu., Novikov P.A., Popovich A.A., Silin A.O., Smirnov V.M., Bobrysheva N.P., Osmolovskaya O.M., Osmolovsky M.G., Rumyantsev A.M.** Atomic layer deposition of tin oxide using tetraethyltin to produce high-capacity Li-ion batteries, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 35 (2017) 01B137. DOI: 10.1116/1.4972554
- [10] **Maximov M.Yu., Novikov P.A., Nazarov D.V., Rumyantsev A.M., Silin A.O., Zhang Y., Popovich A.A.** Characterization and electrochemical performance at high discharge rates of tin dioxide thin films synthesized by atomic layer deposition, *Journal of Electronic Materials*, 46 (2017) 6571–6577. DOI: 10.1007/s11664-017-5701-8
- [11] **Markevich E., Salitra G., Talyosef Y., Kim U.-H., Ryu H.-H., Sun Y.-K., Aurbach D.** High-performance  $\text{LiNiO}_2$  cathodes with practical loading cycled with Li metal anodes in fluoroethylene carbonate-based electrolyte solution, *ACS Applied Energy Materials*, 1 (6) (2018) 2600–2607. DOI: 10.1021/acsaem.8b00304
- [12] **Zhang H., Yu X., Braun P.V.** Three-dimensional bicontinuous ultrafast-charge and -discharge bulk battery electrodes, *Nature Nanotechnology*, 6 (2011) 277–281. DOI: 10.1038/nnano.2011.38
- [13] **Zhu H., Shen R., Tang Y., Yan X., Liu J., Song L., Fan Z., Zheng S., Chen Z.** Sn-doping and  $\text{Li}_2\text{SnO}_3$  nano-coating layer co-modified  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  with improved cycle stability at 4.6 V cut-off voltage, *Nanomaterials*, 10 (5) (2020) 868. DOI: 10.3390/nano10050868

- [14] **Wu Z., Han X., Zheng J., Wei Y., Qiao R., Shen F., Dai J., Hu L., Xu K., Lin Y., Yang W., Pan F.** Depolarized and fully active cathode based on  $\text{Li}(\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3})\text{O}_2$  embedded in carbon nanotube network for advanced batteries, *Nano Letters*, 14 (8) (2014) 4700–4706. DOI: 10.1021/nl5018139
- [15] **Zhou N., Wang Y., Cui H.** Quasi-dynamic study of electrochemical properties of  $\text{O}_3$ -high-Ni ternary single-crystal cathode materials with mirror symmetry: A first-principles study, *Nanoscale*, 15 (45) (2023) 18383–18394. DOI: 10.1039/D3NR04586B
- [16] **Kolchanov D.S., Mitrofanov I., Kim A., Koshtyal Yu., Romyantsev A., Sergeeva E., Vinogradov A., Popovich A., Maximov M.** Inkjet printing of Li-rich cathode material for thin-film lithium-ion microbatteries, *Energy Technology*, 8 (3) (2020) 1901086. DOI: 10.1002/ente.201901086
- [17] **Pang Y., Cao Y., Chu Y., Liu M., Snyder K., MacKenzie D., Cao C.** Additive manufacturing of batteries, *Advanced Functional Materials*, 30 (1) (2020) 1906244. DOI: 10.1002/adfm.201906244
- [18] **Lechner M., Kollenda A., Bendzuck K., Burmeister J.K., Mahin K., Keilhofer J., Kemmer L., Blaschke M.J., Friedl G., Daub R., Kwade A.** Cost modeling for the GWh-scale production of modern lithium-ion battery cells, *Communications Engineering*, 3 (2024) 155. DOI: 10.1038/s44172-024-00306-0
- [19] **Repin A., Borisov E., Kosenko A., Pushnitsa K., Novikov P., Popovich A.** The manufacture and investigation of 3D Current collectors in a lithium ion battery obtained by laser powder bed fusion, *Metals*, 14 (12) (2024) 1358. DOI: 10.3390/met14121358
- [20] **Zhang Y., Kim M., Oh Y., Song H.-W., Lee S.** Electrode architecture design for fast charging lithium-ion batteries: beyond material innovations, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 58 (25) (2025) 253001. DOI: 10.1088/1361-6463/added3
- [21] **Oehm J., Kamlah M., Knoblauch V.** Ultra-thick cathodes for high-energy lithium-ion batteries based on aluminium foams – microstructural evolution during densification and its impact on the electrochemical properties, *Batteries*, 9 (6) (2023) 303. DOI: 10.3390/batteries9060303
- [22] **Kim D.S., Lee J.U., Kim S.H., Hong J.-Y.** Electrochemically exfoliated graphite as a highly efficient conductive additive for an anode in lithium-ion batteries, *Battery Energy*, 2 (5) (2023) 20230012. DOI: 10.1002/bte2.20230012
- [23] **Pavlovskii A., Pushnitsa K., Kosenko A., Novikov P., Popovich A.** 3D-printed lithium-ion battery electrodes: A brief review of three key fabrication techniques, *Materials*, 17 (23) (2024) 5904. DOI: 10.3390/ma17235904
- [24] **Lipu M.S.H., Al Mamun A., Ansari S., Miah M.S., Hasan K., Meraj S.T., Abdolrasol M.G.M., Rahman t., Maruf M.H., Sarker M.R., Aljanad A., Tan N.M.L.** Battery management, key technologies, methods, issues, and future trends of electric vehicles: A pathway toward achieving sustainable development goals, *Batteries*, 8 (9) (2022) 119. DOI: 10.3390/batteries8090119
- [25] **Koo B.-R., Lee Y.-G., Lee S.H., An G.-H., Huang C.** One-pot spray engineering to design  $\text{Na}_{0.44}\text{MnO}_2$  cathode electrodes for high-rate and cycle-stable Na-ion batteries, *Batteries*, 8 (10) (2022) 181. DOI: 10.3390/batteries8100181
- [26] **Srivastava G.** Graphene and its derivatives: Synthesis, applications, and environmental perspectives, *Journal of Advanced Research in Production and Industrial Engineering*, 11 (3, 4) (2024) 26–42.
- [27] **Zhao H., Nie Y., Que D., Hu Y., Li Y.** Improved electrochemical properties of  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ -based cathode material co-modified by Mg-doping and octahedral morphology, *Materials*, 12 (17). (2019) 2807. DOI: 10.3390/ma12172807
- [28] **Eliseeva S.N., Apraksin R.V., Tolstopjatova E.G., Kondratiev V.V.** Electrochemical impedance spectroscopy characterization of  $\text{LiFePO}_4$  cathode material with carboxymethylcellulose and poly-3,4-ethylenedioxythiophene/polystyrene sulfonate, *Electrochimica Acta*, 227 (2017) 357–366. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.12.157
- [29] **Vorobeva K.A., Eliseeva S.N., Apraksin R.V., Kamenskii M.A., Tolstopjatova E.G., Kondratiev V.V.** Improved electrochemical properties of cathode material  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  with conducting polymer binder, *Journal of Alloys and Compounds*, 766 (2018) 33–44. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.06.324

[30] Jung S.-K., Gwon H., Hong J., Park K.-Y., Seo D.-H., Kim H., Hyun J., Yang W., Kang K. Understanding the degradation mechanisms of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  cathode material in lithium ion batteries, *Advanced Energy Materials*, 4 (1) (2014) 1300787. DOI: 10.1002/aenm.201300787

[31] Kim D., Zettsu N., Teshima K. Three-dimensional electric micro-grid networks for high-energy-density lithium-ion battery cathodes, *Journal of Materials Chemistry A*, 5 (2017) 22797–22804. DOI: 10.1039/C7TA05042A

[32] Xu J., Chou S.-L., Gu Q.-f., Liu H.-K., Dou S.-X. The effect of different binders on electrochemical properties of  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$  cathode material in lithium ion batteries, *Journal of Power Sources*, 225 (2013) 172–178. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.10.033

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**НОВИКОВ Павел Александрович** – директор НОЦ «МТМ», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.  
E-mail: novikov\_pa@spbstu.ru

**ЦВЕТКОВА Галина Викторовна** – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.  
E-mail: Tsvetkova\_gv@mail.ru

**ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич** – директор ИММТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.  
E-mail: popovicha@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

### REFERENCES

[1] Y.B. Hendri, Y.-S. Wu, S.-H. Wu, L.-Y. Kuo, J.-K. Chang, A. Amri, R. Jose, C.-C. Yang, Unlocking the synergistic effects of gradient engineering, Mg doping, and in situ Li conductive coating for high-performance Ni-rich  $\text{LiNi}_{0.92}\text{Co}_{0.04}\text{Mn}_{0.04}\text{O}_2$  cathode materials, *Journal of Materials Chemistry A*, 13 (29) (2025) 23902–23927. DOI: 10.1039/D5TA02551F

[2] J. Zeng, Y. Shen, X. Ren, X. Li, Y. Sun, G. Zhang, Z. Wu, S. Zhu, C. Hai, Y. Zhou, F-doped Ni-rich layered cathode material with improved rate performance for lithium-ion batteries, *Processes*, 10 (8) (2022) 1573. DOI: 10.3390/pr10081573

[3] P. Sivaraj, K.P. Abhilash, B. Nalini, P.C. Selvin, S. Goel, S.K. Yadav, Insight into cations substitution on structural and electrochemical properties of nanostructured  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$  cathodes, *Journal of the American Ceramic Society*, 103 (3) (2020) 1685–1697. DOI: 10.1111/jace.16805

[4] J.N. Wang, Z.Q. Li, Y.Z. Zhu, Y. Liang, Y. Cui, H.L. Tao, B. Song, A. Nikiforov, Z.H. Zhang, Effects of doping on electronic structure and ion diffusion of  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ , *Journal of the American Ceramic Society*, 107 (1) (2024) 344–354. DOI: 10.1111/jace.19461

[5] D. Uxa, H.J. Holmes, K. Meyer, L. Dörrerac, H. Schmidt, Lithium tracer diffusion in  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$  cathode material for lithium-ion batteries, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23 (10) (2021) 5992–5998. DOI: 10.1039/D0CP05593J

[6] M. Dewan, T. Majumder, S.B. Majumder, Electrophoretically deposited bismuth iron oxide as dual role anode material for both lithium and sodium-ion batteries, *Materials Today Communications*, 27 (2021) 102358. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102358

- [7] **N. Nitta, F. Wu, J.T. Lee, G. Yushin**, Li-ion battery materials: present and future, *Materials Today*, 18 (5) (2015) 252–264. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040
- [8] **B. Sun, S. Mao, S. Zhu, G. Zhou, Y. Xia, Y. Zhao**, Improved rate and cycling performances of electrodes based on BiFeO<sub>3</sub> nanoflakes by compositing with organic pectin for advanced rechargeable Na-ion batteries, *ACS Applied Nano Materials*, 1 (3) (2018) 1291–1299. DOI: 10.1021/acsanm.8b00011
- [9] **D.V. Nazarov, M.Yu. Maximov, P.A. Novikov, A.A. Popovich, A.O. Silin, V.M. Smirnov, N.P. Bobrysheva, O.M. Osmolovskaya, M.G. Osmolovsky, A.M. Rumyantsev**, Atomic layer deposition of tin oxide using tetraethyltin to produce high-capacity Li-ion batteries, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 35 (2017) 01B137. DOI: 10.1116/1.4972554
- [10] **M.Yu. Maximov, P.A. Novikov, D.V. Nazarov, A.M. Rumyantsev, A.O. Silin, Y. Zhang, A.A. Popovich**, Characterization and electrochemical performance at high discharge rates of tin dioxide thin films synthesized by atomic layer deposition, *Journal of Electronic Materials*, 46 (2017) 6571–6577. DOI: 10.1007/s11664-017-5701-8
- [11] **E. Markevich, G. Salitra, Y. Talyosef, U.-H. Kim, H.-H. Ryu, Y.-K. Sun, D. Aurbach**, High-performance LiNiO<sub>2</sub> cathodes with practical loading cycled with Li metal anodes in fluoroethylene carbonate-based electrolyte solution, *ACS Applied Energy Materials*, 1 (6) (2018) 2600–2607. DOI: 10.1021/acsaem.8b00304
- [12] **H. Zhang, X. Yu, P.V. Braun**, Three-dimensional bicontinuous ultrafast-charge and -discharge bulk battery electrodes, *Nature Nanotechnology*, 6 (2011) 277–281. DOI: 10.1038/nnano.2011.38
- [13] **H. Zhu, R. Shen, Y. Tang, X. Yan, J. Liu, L. Song, Z. Fan, S. Zheng, Z. Chen**, Sn-doping and Li<sub>2</sub>SnO<sub>3</sub> nano-coating layer co-modified LiNi<sub>0.5</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.3</sub>O<sub>2</sub> with improved cycle stability at 4.6 V cut-off voltage, *Nanomaterials*, 10 (5) (2020) 868. DOI: 10.3390/nano10050868
- [14] **Z. Wu, X. Han, J. Zheng, Y. Wei, R. Qiao, F. Shen, J. Dai, L. Hu, K. Xu, Y. Lin, W. Yang, F. Pan**, Depolarized and fully active cathode based on Li(Ni<sub>0.5</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.3</sub>)O<sub>2</sub> embedded in carbon nanotube network for advanced batteries, *Nano Letters*, 14 (8) (2014) 4700–4706. DOI: 10.1021/nl5018139
- [15] **N. Zhou, Y. Wang, H. Cui**, Quasi-dynamic study of electrochemical properties of O<sub>3</sub>-high-Ni ternary single-crystal cathode materials with mirror symmetry: A first-principles study, *Nanoscale*, 15 (45) (2023) 18383–18394. DOI: 10.1039/D3NR04586B
- [16] **D.S. Kolchanov, I. Mitrofanov, A. Kim, Yu. Koshtyal, A. Rumyantsev, E. Sergeeva, A. Vinogradov, A. Popovich, M. Maximov**, Inkjet printing of Li-rich cathode material for thin-film lithium-ion microbatteries, *Energy Technology*, 8 (3) (2020) 1901086. DOI: 10.1002/ente.201901086
- [17] **Y. Pang, Y. Cao, Y. Chu, M. Liu, K. Snyder, D. MacKenzie, C. Cao**, Additive manufacturing of batteries, *Advanced Functional Materials*, 30 (1) (2020) 1906244. DOI: 10.1002/adfm.201906244
- [18] **M. Lechner, A. Kollenda, K. Bendzuck, J.K. Burmeister, K. Mahin, J. Keilhofer, L. Kemmer, M.J. Blaschke, G. Friedl, R. Daub, A. Kwade**, Cost modeling for the GWh-scale production of modern lithium-ion battery cells, *Communications Engineering*, 3 (2024) 155. DOI: 10.1038/s44172-024-00306-0
- [19] **A. Reppin, E. Borisov, A. Kosenko, K. Pushnitsa, P. Novikov, A. Popovich**, The manufacture and investigation of 3D Current collectors in a lithium ion battery obtained by laser powder bed fusion, *Metals*, 14 (12) (2024) 1358. DOI: 10.3390/met14121358
- [20] **Y. Zhang, M. Kim, Y. Oh, H.-W. Song, S. Lee**, Electrode architecture design for fast charging lithium-ion batteries: beyond material innovations, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 58 (25) (2025) 253001. DOI: 10.1088/1361-6463/added3
- [21] **J. Oehm, M. Kamlah, V. Knoblauch**, Ultra-thick cathodes for high-energy lithium-ion batteries based on aluminium foams – microstructural evolution during densification and its impact on the electrochemical properties, *Batteries*, 9 (6) (2023) 303. DOI: 10.3390/batteries9060303
- [22] **D.S. Kim, J.U. Lee, S.H. Kim, J.-Y. Hong**, Electrochemically exfoliated graphite as a highly efficient conductive additive for an anode in lithium-ion batteries, *Battery Energy*, 2 (5) (2023) 20230012. DOI: 10.1002/bte2.20230012

- [23] A. Pavlovskii, K. Pushnitsa, A. Kosenko, P. Novikov, A. Popovich, 3D-printed lithium-ion battery electrodes: A brief review of three key fabrication techniques, *Materials*, 17 (23) (2024) 5904. DOI: 10.3390/ma17235904
- [24] M.S.H. Lipu, A. Al Mamun, S. Ansari, M.S. Miah, K. Hasan, S.T. Meraj, M.G.M. Abdolrasol, t. Rahman, M.H. Maruf, M.R. Sarker, A. Aljanad, N.M.L. Tan, Battery management, key technologies, methods, issues, and future trends of electric vehicles: A pathway toward achieving sustainable development goals, *Batteries*, 8 (9) (2022) 119. DOI: 10.3390/batteries8090119
- [25] B.-R. Koo, Y.-G. Lee, S.H. Lee, G.-H. An, C. Huang, One-pot spray engineering to design  $\text{Na}_{0.44}\text{MnO}_2$  cathode electrodes for high-rate and cycle-stable Na-ion batteries, *Batteries*, 8 (10) (2022) 181. DOI: 10.3390/batteries8100181
- [26] G. Srivastava, Graphene and its derivatives: Synthesis, applications, and environmental perspectives, *Journal of Advanced Research in Production and Industrial Engineering*, 11 (3, 4) (2024) 26–42.
- [27] H. Zhao, Y. Nie, D. Que, Y. Hu, Y. Li, Improved electrochemical properties of  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ -based cathode material co-modified by Mg-doping and octahedral morphology, *Materials*, 12 (17). (2019) 2807. DOI: 10.3390/ma12172807
- [28] S.N. Eliseeva, R.V. Apraksin, E.G. Tolstopjatova, V.V. Kondratiev, Electrochemical impedance spectroscopy characterization of  $\text{LiFePO}_4$  cathode material with carboxymethylcellulose and poly-3,4-ethylendioxythiophene/polystyrene sulfonate, *Electrochimica Acta*, 227 (2017) 357–366. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.12.157
- [29] K.A. Vorobeva, S.N. Eliseeva, R.V. Apraksin, M.A. Kamenskii, E.G. Tolstopjatova, V.V. Kondratiev, Improved electrochemical properties of cathode material  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  with conducting polymer binder, *Journal of Alloys and Compounds*, 766 (2018) 33–44. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.06.324
- [30] S.-K. Jung, H. Gwon, J. Hong, K.-Y. Park, D.-H. Seo, H. Kim, J. Hyun, W. Yang, K. Kang, Understanding the degradation mechanisms of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  cathode material in lithium ion batteries, *Advanced Energy Materials*, 4 (1) (2014) 1300787. DOI: 10.1002/aenm.201300787
- [31] D. Kim, N. Zettsu, K. Teshima, Three-dimensional electric micro-grid networks for high-energy-density lithium-ion battery cathodes, *Journal of Materials Chemistry A*, 5 (2017) 22797–22804. DOI: 10.1039/C7TA05042A
- [32] J. Xu, S.-L. Chou, Q.-f. Gu, H.-K. Liu, S.-X. Dou, The effect of different binders on electrochemical properties of  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$  cathode material in lithium ion batteries, *Journal of Power Sources*, 225 (2013) 172–178. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.10.033

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Pavel A. NOVIKOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: novikov\_pa@spbstu.ru

**Galina V. TSVETKOVA** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: Tsvetkova\_gv@mail.ru

**Anatoliy A. POPOVICH** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: popovicha@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

**Поступила: 22.07.2025; Одобрена: 25.08.2025; Принята: 29.08.2025.**  
**Submitted: 22.07.2025; Approved: 25.08.2025; Accepted: 29.08.2025.**