

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДОВ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ¹

© 2020 г. А. А. Кузьмина^а, Т. Л. Кулова^{а, *}, Е. К. Тусеева^а, Е. В. Чиркова^{а, б}

^аИнститут физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН
Ленинский просп., 31, корп. 4, Москва, 119071 Россия

^бНациональный исследовательский университет “МЭИ”
ул. Красноказарменная, 14, Москва, 111250 Россия

*e-mail: tkulova@mail.ru

Поступила в редакцию 14.12.2019 г.

После доработки 16.02.2020 г.

Принята к публикации 20.02.2020 г.

Исследованы зарядные и разрядные характеристики электродов основе $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ (NCA) и $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO) в растворе LiClO_4 в смеси пропиленкарбоната с диметоксиэтаном при температурах от -45 до $+60^\circ\text{C}$. В обоих случаях разрядная емкость уменьшается при снижении температуры, и эта зависимость не описывается уравнением Пейкерта. При снижении температуры увеличивается также поляризация, причем эффективная энергия активации на электроде из NCA составляет 52 кДж/моль, а на электроде из LTO – только 23 кДж/моль. Подтверждена возможность эксплуатации аккумуляторов системы NCA–LTO при температурах до -40°C .

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, внедрение лития, титанат лития, тройной литированный оксид (NCA), влияние температуры, энергия активации

DOI: 10.31857/S0424857020100060

ВВЕДЕНИЕ

Большинство современных литий-ионных аккумуляторов не рассчитано на эксплуатацию при пониженных температурах. Разрядная емкость типичного аккумулятора при температуре -20°C не превышает половины емкости при комнатной температуре. Изменение температуры влияет как на скорость транспортных процессов в электролите и твердой фазе электродов, так и на скорость электродных процессов. Чаще всего в литий-ионных аккумуляторах используются положительные электроды на основе LiCoO_2 или смешанных слоистых оксидов (например, $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$, NMC), отрицательные электроды на основе углеродных материалов и раствор LiPF_6 в смеси этиленкарбоната с алкилкарбонатами в качестве электролита. В настоящей работе оценено влияние температуры на работу другой электрохимической системы. Здесь исследовались положительные электроды на основе $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ (NCA) и отрицательные электроды на основе $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO), а в качестве электролита – рас-

твор LiClO_4 в смеси пропиленкарбоната с диметоксиэтаном (7 : 3). Такой электролит широко используется, в частности в первичных литиевых элементах; его температура замерзания составляет около -70°C .

Низкие температуры затрудняют все ключевые моменты работы литий-ионного аккумулятора, такие как перенос заряда на границе раздела электрод/электролит [1] и транспорт ионов лития в SEI, электролите и электродах [1–3], приводя к потере мощности. Коммерческий электролит состава 1 M LiPF_6 в смеси ЭК–ДМК–ДЭК замерзает при температуре около -30°C . Следовательно, медленная ионная проводимость в таком электролите является основной проблемой для эффективной работы низкотемпературных литий-ионных аккумуляторов [3, 4]. Дополнительной причиной плохой работы литий-ионного аккумулятора с углеродным анодом является медленная диффузия ионов лития в углероде при низкой температуре [2, 5], т.е. снижение емкости аккумулятора с углеродными анодами обусловлено кинетическими причинами. Высокое сопротивление переноса заряда при низких температурах приводит к высокой электрохимической поляризации [5–8].

¹ Статья посвящена памяти выдающегося электрохимика Владимира Сергеевича Багоцкого, 100-летний юбилей которого отмечается в 2020 г.

Кроме того, при низких температурах возникают затруднения массопереноса на границе раздела электрод/электролит, вызывающие концентрационную поляризацию [9–11].

Увеличение поляризации при низких температурах может приводить к образованию дендритов на отрицательном электроде и нарушению целостности SEI на отрицательном электроде [12].

Таким образом, при низких температурах уменьшается литий-ионная проводимость на границе раздела электрод/электролит, в электролите, в SEI, в положительном и отрицательном электродах. Во всех этих процессах низкая скорость переноса ионов лития на границе раздела электрод/электролит, обусловленная низкой кинетикой электрохимической реакции, является моментом, определяющим скорость при низкотемпературном заряде и разряде.

NCA как материал положительного электрода литий-ионных аккумуляторов был предложен в 2006 г. [13] и в последнее время начал набирать популярность. Он является представителем семейства материалов с общей формулой $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Al}_y\text{O}_2$ [14, 15]. В литературе нет информации о характеристиках электродов на основе NCA при пониженных температурах, напротив, указывается на ускорение деградации таких электродов при температурах, значительно выше комнатной [16, 17]. Во всех упомянутых работах использовались электролиты на основе 1 М LiPF_6 в смеси этиленкарбонат (ЭК)—диэтилкарбонат (ДЭК)—диметилкарбонат (ДМК) (1 : 1 : 1).

Электрохимические характеристики $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ исследованы достаточно подробно. В работе [18] разрядные характеристики электродов на основе титаната лития были получены в интервале температур от -15 до $+60^\circ\text{C}$. В работе [15] также был использован электролит с 1 М LiPF_6 в смеси этиленкарбонат—диэтилкарбонат—диметилкарбонат (1 : 1 : 1).

Настоящая работа является продолжением серии работ по исследованию электрохимического поведения функциональных материалов литий-ионного аккумулятора при пониженных температурах [18, 19] с целью изучения электрохимического поведения NCA и LTO при пониженных температурах.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Электроды изготавливали из коммерческих материалов NCA и LTO (Gelon LIB Co., Ltd., КНР) по стандартной намоточной технологии. В качестве токоотвода использовали сетку из нержавеющей стали. Активную массу готовили смешением порошка NCA или LTO (80 мас. %), сажи (15 мас. %, Timcal, Бельгия) и поливинилиденфторида (5 мас. %, Aldrich), предварительно

растворенного в N-метилпирролидоне (Aldrich). Количество активного вещества на электроде составляло $5\text{--}7$ мг/см². Электроды прессовали давлением 1000 кг/см² с последующей сушкой под вакуумом при температуре 120°C в течение 8 ч.

Электрохимические измерения проводили в трехэлектродных герметичных ячейках с литиевым вспомогательным электродом и литиевым электродом сравнения. Ячейки собирали и заполняли электролитом в перчаточном боксе с атмосферой сухого аргона (“Спектроскопические системы”, Россия). В качестве электролита использовали 1 М LiClO_4 в смеси пропиленкарбонат—диметоксиэтан (7 : 3) (все компоненты электролита имели квалификацию “extra dry” и были приобретены в Aldrich). Содержание воды в электролите, измеренное методом титрования по Фишеру (Ti-Touch (Metrohm, Switzerland), не превышало 15 ppm. В качестве сепаратора использовали нетканый полипропилен толщиной 25 мкм (НПО “Уфим”, Россия). На каждой собранной ячейке проводили измерения при всех температурах без промежуточного демонтажа ячеек.

Гальваностатическое тестирование электрохимических ячеек проводили с помощью компьютеризированного стенда (ЗАО “Бустер”, Россия). Во всех случаях ток заряда был равен току разряда. Ячейка размещалась в камере тепла—холода КТХ-74-65/165 (ОАО “Смоленское СКТБ СПУ”, Россия), обеспечивающей поддержание рабочей температуры с погрешностью не более 0.5°C . Перед началом гальваностатических измерений ячейку выдерживали при рабочей температуре не менее 1 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Тестирование электродов из NCA

На рис. 1 приведены зарядные и разрядные кривые для электрода из NCA, полученные при комнатной температуре и токах от 20 до 3200 мА/г, что соответствовало режимам от C/10 до 16 C. Качественно эти кривые не отличаются от кривых, приведенных в литературе [13, 19–21], несмотря на различие в природе электролита.

С ростом токовой нагрузки разрядная емкость электрода на основе NCA уменьшается, и зависимость емкости (Q) от плотности тока (i) не подчиняется обычному уравнению Пейккерта

$$Q = \frac{Q^0}{i^a}, \quad (1)$$

т.е. не линеаризуется в координатах $\lg Q, \lg i$ (рис. 2). Невыполнимость уравнения Пейккерта может свидетельствовать о том, что в данном случае лимитирующей стадией электродного процесса не является единственная транспортная стадия в системе с распределенными параметрами.

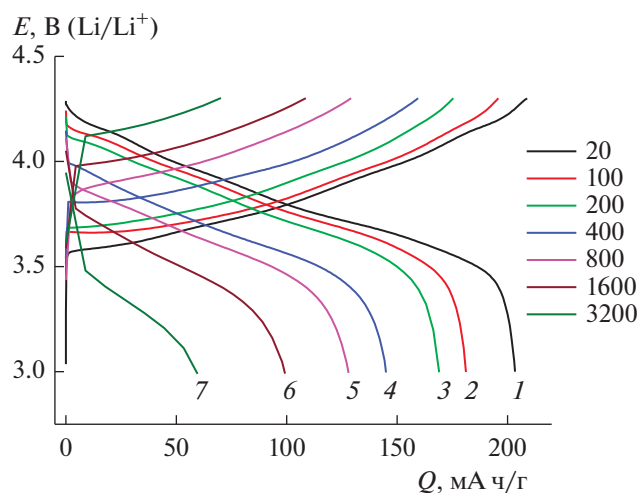


Рис. 1. Гальваностатические зарядные и разрядные кривые на электроде из NCA при плотностях тока, мА/г: 20 (1), 100 (2), 200 (3), 400 (4), 800 (5), 1600 (6) и 3200 (7), что соответствует режимам C/10, C/2, C, 2 C, 4 C, 8 C и 16 C.

На рис. 2 приведены также литературные данные, удовлетворительно согласующиеся с результатами настоящей работы, что подтверждает неслучайность сделанного выше вывода.

Рисунок 3 демонстрирует гальваностатические зарядные и разрядные кривые электрода из NCA, полученные в режиме C/2 (т.е. при плотности тока 100 мА/г) при температурах от +60 до -45°C . При регистрации гальваностатических кривых при всех температурах выше -40°C анодным пределом был выбран потенциал 4.3 В, а ка-

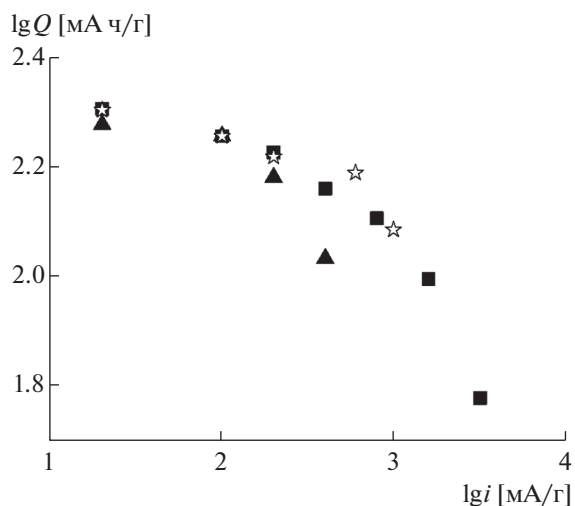


Рис. 2. Зависимость емкости (Q) электродов из NCA от плотности тока (i) в билгарифмических координатах. Квадраты – данные настоящей работы, треугольники – из [19], звездочки – из [20].

тодным пределом – 3.0 В. При температурах -40 и -45°C пределы были произвольно расширены с учетом сильного роста поляризации, в том числе омической составляющей. Это несколько осложняет количественный анализ результатов, но не изменяет качественной картины. Как и следовало ожидать, снижение температуры приводит преимущественно к такому же эффекту, как и повышение тока: возрастает поляризация, снижается разрядная емкость.

Природа температурной зависимости емкости интрекаляционных электродов неоднократно обсуждалась в литературе (напр., [18, 22, 23]). Предполагалось, что если лимитирующей стадией электродного процесса является твердофазная диффузия лития, то в гальваностатических условиях при относительно малых плотностях тока литий внедряется во всю глубину частиц активного материала; при увеличении плотности тока толщина диффузионного слоя к моменту достижения нулевой поверхностной концентрации и резкого изменения потенциала (т.е., когда время опыта равно переходному времени гальваностатического процесса) становится меньше размера частиц материала, и емкость оказывается меньше предельной. Поскольку переходное время, а следовательно, и разрядная емкость пропорциональны коэффициенту диффузии лития, температурная зависимость емкости должна совпадать с температурной зависимостью коэффициента диффузии лития. Именно такая ситуация реализуется при внедрении лития в графит [22]. Здесь температурная зависимость емкости хорошо описывалась уравнением Аррениуса (так же, как и температурная зависимость коэффициента диффузии).

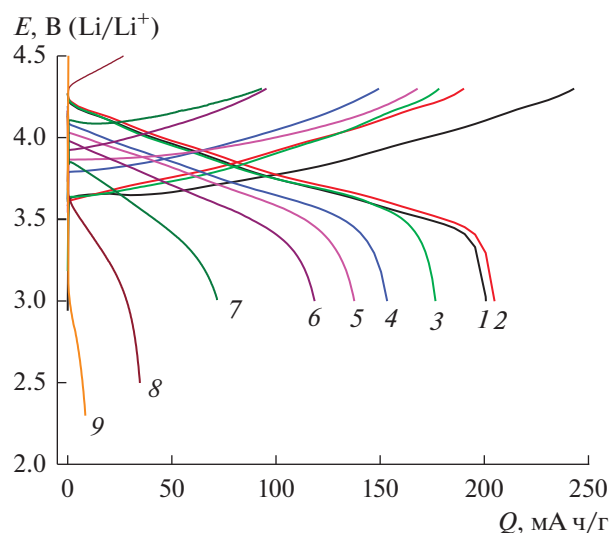


Рис. 3. Гальваностатические зарядные и разрядные кривые электрода из NCA, полученные при плотности тока 100 мА/г и температурах, $^{\circ}\text{C}$: 60 (1), 50 (2), 20 (3), 0 (4), -10 (5), -20 (6), -30 (7), -40 (8) и -45 (9).

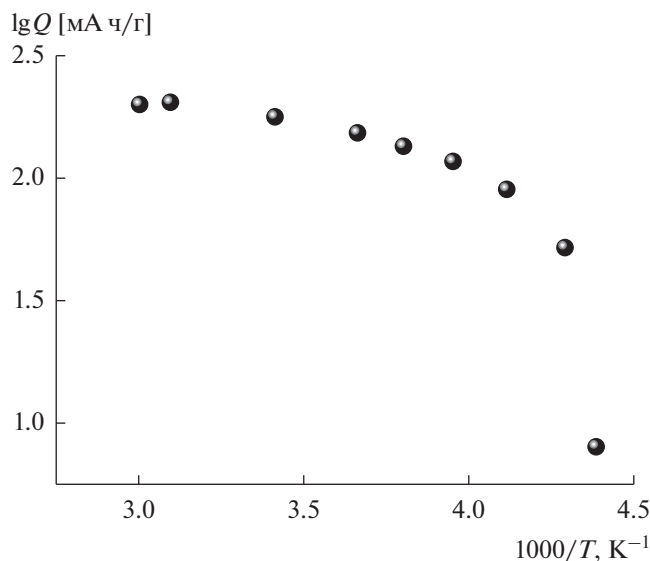


Рис. 4. Температурная зависимость разрядной емкости электрода из NCA в аррениусовских координатах.

Температурная зависимость емкости электрода на основе NCA показана на рис. 4.

Видно, что эта зависимость не описывается простым уравнением Аррениуса. Примерно такой же результат был получен при исследовании температурной зависимости емкости электродов из феррофосфата лития. При температуре выше 45°C разрядная емкость не зависит от температуры и приближается к своему предельному теоретическому значению. При пониженных температурах, снижение температуры сопровождается увеличением энергии активации (увеличение наклон кривой, представленной в координатах Ар-

рениуса) [23]. В этой же статье обсуждены возможные причины отклонений характера температурной зависимости разрядной емкости от простой аррениусовской.

Заметное отличие влияния температуры на внедрение лития в NCA от влияния температуры на внедрение лития в LiFePO_4 сказывается также на характере изменения формы гальваностатических кривых с изменением температуры. Это отличие наглядно видно при представлении гальваностатических кривых в нормализованных координатах (когда по оси абсцисс отложено отношение текущей емкости к конечной емкости). Такое сравнение приведено на рис. 5, где на рис. 5а показаны кривые рис. 3 в нормализованных координатах, а на рис. 5б — соответствующие данные для электрода из LiFePO_4 , заимствованные из [23].

Как видно, снижение температуры приводит к практически параллельному смещению разрядных кривых электрода из NCA без заметного изменения формы кривых, причем при изменении температуры от $+60$ до -10°C смещение кривых сопоставимо с экспериментальной погрешностью. Наглядное представление о влиянии температуры на поляризацию электрода из NCA дает зависимость потенциала при степени разряженности, равной 50%, от температуры. Эта зависимость показана на рис. 6.

Можно было бы предположить, что поляризация при пониженных температурах связана с ростом сопротивления электролита. Для проверки этого предположения полезно проанализировать температурную зависимость поляризации в аррениусовских координатах. Такая зависимость приведена на рис. 7. Здесь в качестве поляризации (ΔE) использована разность потенциала $E_{1/2}$ при

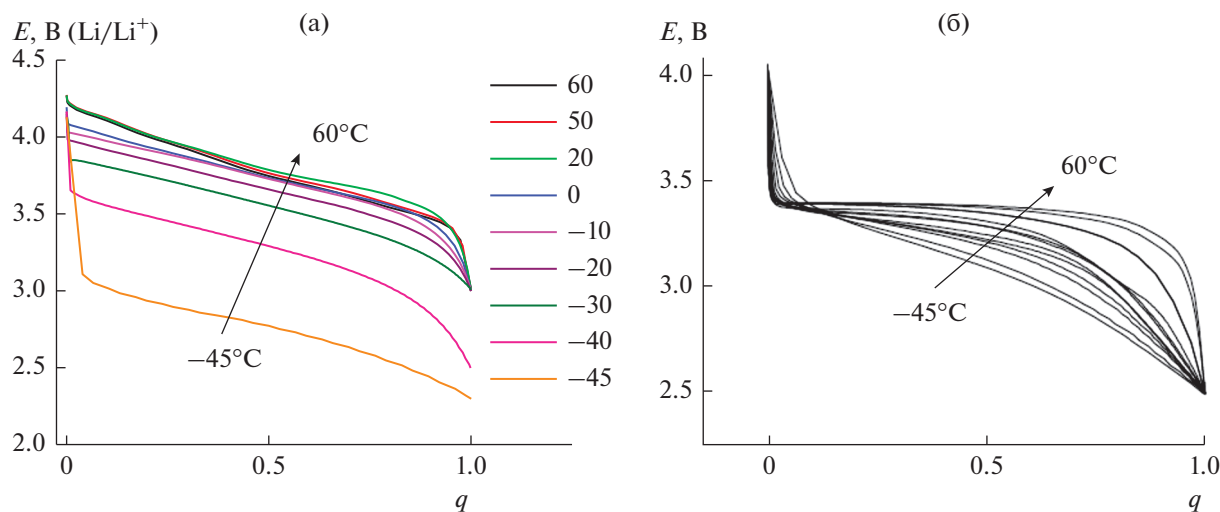


Рис. 5. Гальваностатические разрядные кривые в нормализованных координатах: а — данные для NCA, пересчет рис. 3; б — данные для LiFePO_4 (из [23]).

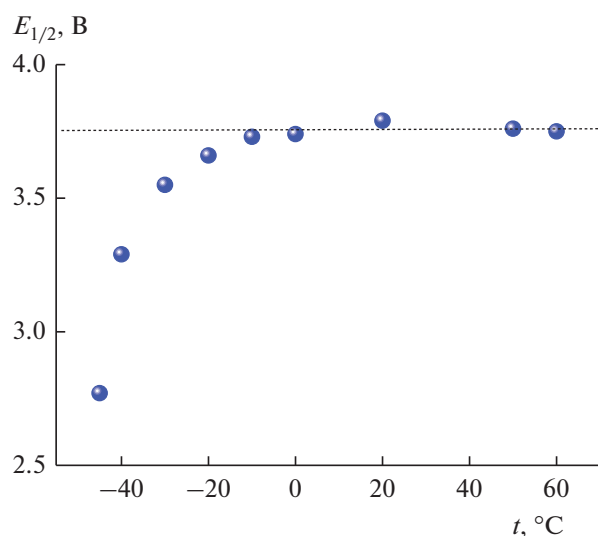


Рис. 6. Зависимость потенциала электрода из NCA при разряде на 50% от температуры.

низких температурах и потенциала при температурах от 0 до +60°C (пунктирная прямая на рис. 6).

Как видно, температурная зависимость поляризации при отрицательных температурах хорошо описывается уравнением Аррениуса. Наклон прямой на рис. 7 соответствует энергии активации 52 кДж/моль. Это значение слишком велико для энергии активации проводимости электролита, что свидетельствует о значительном вкладе затруднений не транспортных процессов в кинетику электродного процесса при отрицательных температурах и согласуется с сформулированным выше выводом о природе нелинейной зависимости на рис. 4.

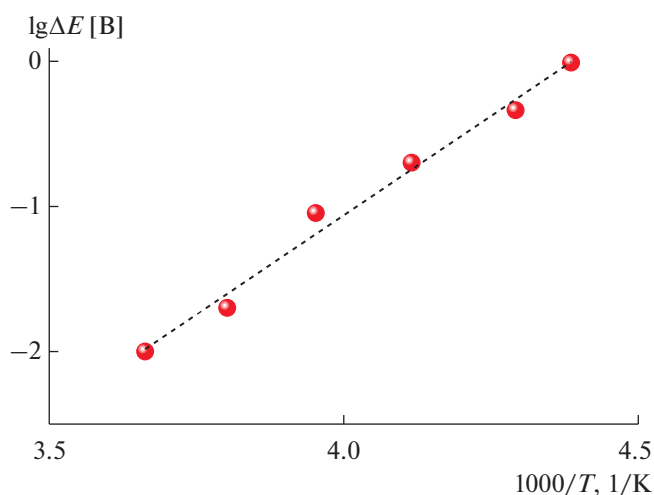


Рис. 7. Температурная зависимость поляризации при катодном процессе на электроде из NCA. Прямая проведена по методу наименьших квадратов.

Электроды из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$

В работе [18] гальваностатические кривые на электроде из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ были получены в режимах C/8, C/1.6 и 1.2 C в электролите состава 1 M LiPF_6 в смеси этиленкарбонат–диэтилкарбонат–диметилкарбонат (1 : 1 : 1). В настоящей работе с использованием электролита состава 1 M LiClO_4 в смеси пропиленкарбонат–диметоксигетан (7 : 3) диапазон токов заряда и разряда составлял от C/8 до 12.5 C. На рис. 8 приведены гальваностатические кривые, полученные при комнатной температуре. Вид этих кривых качественно не отличается от вида кривых в работе [18].

Зависимость разрядной емкости от плотности тока, здесь так же как и в случае с электродами на основе NCA, не описывается уравнением Пейкерта (рис. 9).

С изменением температуры характер гальваностатических кривых, полученных на электроде из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ в электролите на основе LiClO_4 , качественно изменяется так же, как и при измерениях в стандартном электролите с LiPF_6 [21], но температурный диапазон в данном случае был расширен до -40°C. Гальваностатические зарядные и разрядные кривые на электроде из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, полученные в режиме C/1.6 (т. е., при токе 100 мА/г) при температурах от +60 до -40°C, показаны на рис. 10.

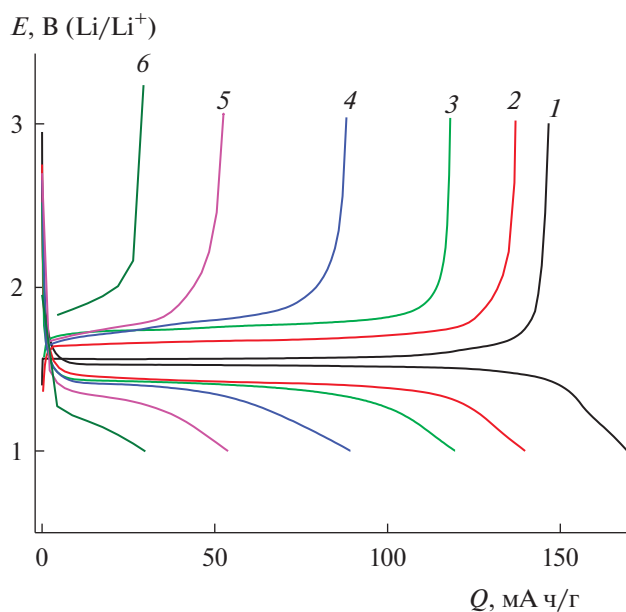


Рис. 8. Гальваностатические зарядные и разрядные кривые на электроде из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ при токах (мА/г) 20 (1), 100 (2), 200 (3), 400 (4), 800 (5) и 2000 (6), что соответствует режимам C/8, C/1.6, 1.25 C, 2.5 C, 5 C и 12.5 C.

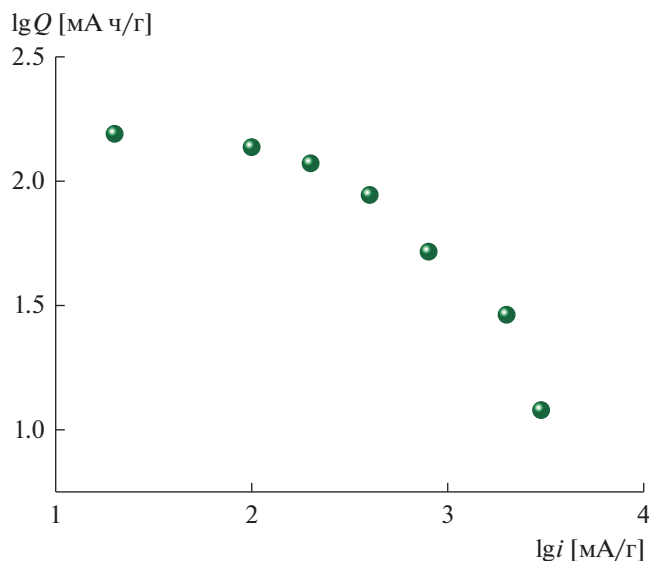


Рис. 9. Зависимость емкости (Q) электродов из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ от плотности тока (i) в билогарифмических координатах.

Зависимость разрядной емкости электрода из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ от температуры показана на рис. 11 в аррениусовских координатах. Здесь же для сравнения приведены данные из работы [18], в которой проводили измерения на электродах из того же материала в электролите состава 1 М LiPF_6 в смеси этиленкарбонат–диэтилкарбонат–диметилкарбонат (1 : 1 : 1).

Видно, что качественный характер температурной зависимости емкости, измеренной в разных электролитах одинаков. При температурах выше 0°C емкость почти не зависит от температуры (наклон этой зависимости соответствует формальному значению энергии активации около 2 кДж/моль), а при более низких температурах хорошо выполняется уравнение Аррениуса. Однако наклон низкотемпературного участка этой зависимости несколько различается при измерениях в разных электролитах. При измерениях в растворе 1 М LiClO_4 в смеси пропиленкарбоната с диметоксиэтаном (7 : 3) (настоящая работа) этот наклон соответствует энергии активации около 26 кДж/моль, а при измерениях в растворе 1 М LiPF_6 в смеси этиленкарбонат–диэтилкарбонат–диметилкарбонат (1 : 1 : 1) [18] этот наклон соответствует энергии активации около 34 кДж/моль. Это различие в эффективной энергии активации явно выходит за рамки экспериментальной погрешности, и именно оно позволило в настоящей работе проводить измерения при более низких температурах, чем в работе [18].

На рис. 12 кривые для рис. 10 приведены в нормализованных координатах. В целом характер этих кривых качественно такой же, как в работе

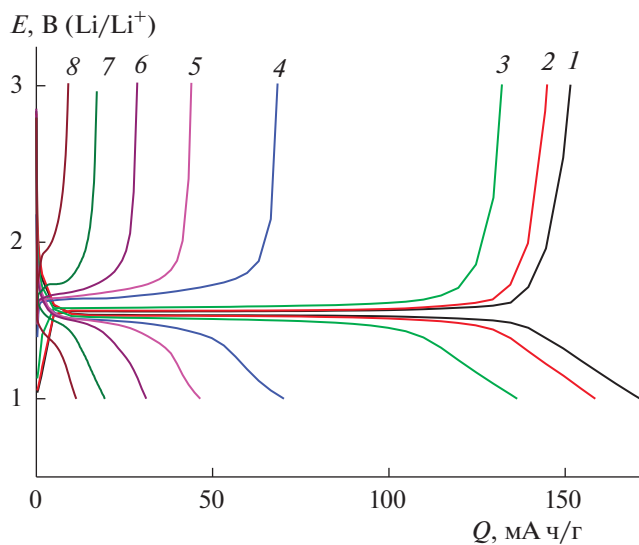


Рис. 10. Гальваностатические зарядные и разрядные кривые на электроде из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, полученные при плотности тока 100 мА/г и температурах, $^\circ\text{C}$: 60 (1), 40 (2), 20 (3), 0 (4), -10 (5), -20 (6), -30 (7) и -40 (8).

[18], несмотря на различие в природе электролита. В то же время, изменение формы анодных кривых (при экстракции ионов лития), полученных в настоящей работе, с изменением температуры заметно больше, чем для кривых, полученных в стандартном этиленкарбонатном электро-

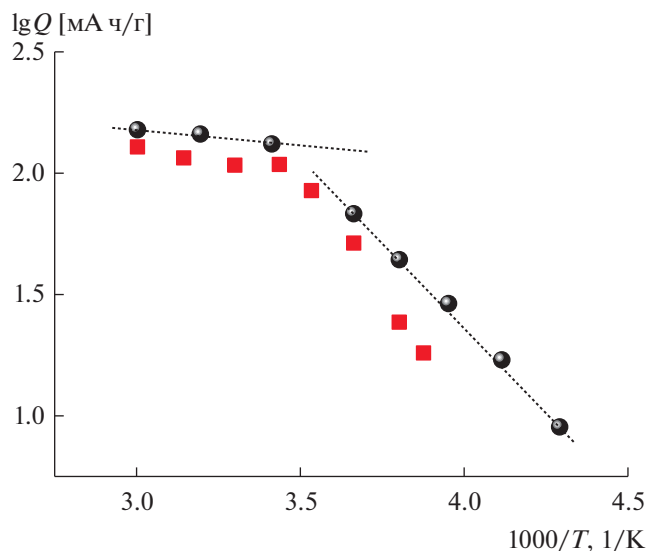


Рис. 11. Температурная зависимость емкости электродов из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ по данным настоящей работы (кружки, измерения в растворе 1 М LiClO_4 в смеси пропиленкарбоната с диметоксиэтаном (7 : 3)) и по данным работы [18] (квадраты, измерения в растворе 1 М LiPF_6 в смеси этиленкарбонат–диэтилкарбонат–диметилкарбонат (1 : 1 : 1))

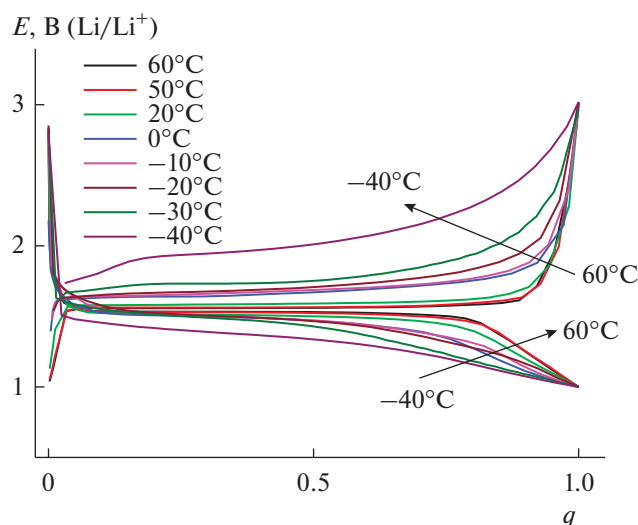


Рис. 12. Кривые рис. 10 в нормализованных координатах.

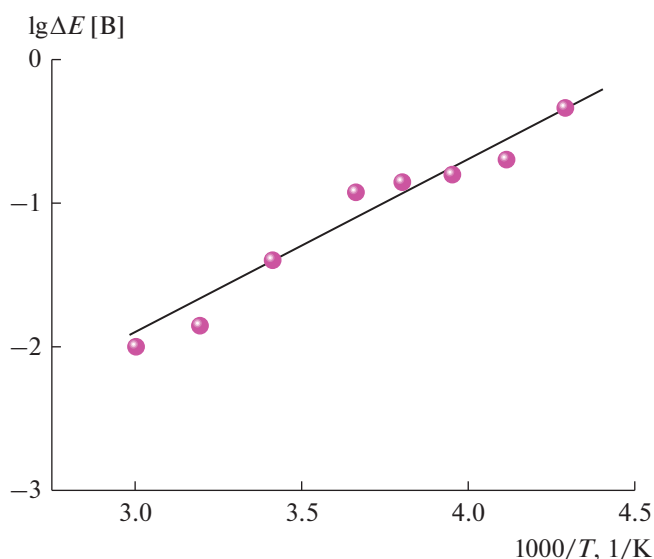


Рис. 13. Температурная зависимость поляризации при экстракции ионов лития из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.

лите [18]. Заметное изменение формы разрядных кривых на электроде из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ с температурой качественно отличает их от поведения электродов из NCA (рис. 5а).

На рис. 13 приведена температурная зависимость поляризации анодного процесса (экстракции ионов лития) на электроде из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (отклонение потенциала при данной температуре от бестокового потенциала при температуре 60°C). Несмотря на значительный разброс данных эту зависимость можно описать уравнением Аррениуса с энергией активации 23 кДж/моль. Такое

значение сопоставимо с энергией активации проводимости жидкого электролита, но утверждать, что именно сопротивление электролита определяет кинетику экстракции ионов лития из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, нельзя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование показало, что замена традиционного электролита литий-ионного аккумулятора состава 1 M LiPF_6 в смеси этиленкарбонат–диэтилкарбонат–диметилкарбонат (1 : 1 : 1) на электролит состава 1 M LiClO_4 в смеси пропиленкарбоната с диметоксиэтаном (7 : 3) позволяет циклировать электроды из титаната лития и литированного оксида кобальта, никеля, алюминия в диапазоне температур от 60 до -45°C . Такая возможность обеспечена низкой температурой заморозки электролита на основе пропиленкарбоната, отсутствием большой необратимой емкости на отрицательном электроде, поскольку разряд на титанате лития ограничивается потенциалом 1 В, т.е. выше потенциала восстановления пропиленкарбоната и диметоксиэтана, а также относительно низкой энергией активации процессов на положительном и отрицательном электродах. Температурная зависимость поляризации литированного оксида кобальта, никеля, алюминия соответствует энергии активации 52 кДж/моль. Температурная зависимость поляризации титаната лития соответствует энергии активации 23 кДж/моль, что сопоставимо с энергией активации проводимости жидкого электролита. Результаты настоящей работы свидетельствуют о возможности изготовления литий-ионного аккумулятора, работоспособного при температурах до -45°C в токовом режиме 1 С.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Liao, X.-Z., Ma, Z.-F., Gong, Q., He, Y.-S., Pei, L., and Zeng, L.-J., Low-temperature performance of LiFePO_4/C cathode in a quaternary carbonate-based electrolyte, *Electrochem. Commun.*, 2008, vol. 10, p. 691. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2008.02.017>
- Huang, C.K., Sakamoto, J.S., Wolfenstine, J., and Surampudi, S., The Limits of Low-Temperature Performance of Li-Ion Cells, *J. Electrochem. Soc.*, 2000,

- vol. 147, p. 2893.
<https://doi.org/10.1149/1.1393622>
- Smart, M., Ratnakumar, B., and Surampudi, S., Electrolytes for Low-Temperature Lithium Batteries Based on Ternary Mixtures of Aliphatic Carbonates, *J. Electrochem. Soc.*, 1999, vol. 146, p. 486.
<https://doi.org/10.1149/1.1391633>
 - Plichta, E.J. and Behl, W.K., A low-temperature electrolyte for lithium and lithium-ion batteries, *J. Power Sources*, 2000, vol. 88, p. 192.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(00\)00367-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00367-0)
 - Zhang, S.S., Xu, K., and Jow, T.R., Electrochemical impedance study on the low temperature of Li-ion batteries, *Electrochem. Acta*, 2004, vol. 49, p. 1057.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2003.10.016>
 - Nagasubramanian, G., Electrical characteristics of 18650 Li-ion cells at low temperatures, *J. Appl. Electrochem.*, 2001, vol. 31, p. 99.
<https://doi.org/10.1023/A:1004113825283>
 - Chunsheng, W., Appleby, A.J., and Little, F.E., Low-Temperature Characterization of Lithium-Ion Carbon Anodes via Microperurbation Measurement, *J. Electrochem. Soc.*, 2002, vol. 149, p. A754.
<https://doi.org/10.1149/1.1474427>
 - Zhang, S.S., Xu, K., and Jow, T.R., Enhanced performance of Li-ion cell with LiClO₄-PC based electrolyte by addition of small amount of LiBOB, *J. Power Sources*, 2006, vol. 156, p. 629.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.04.023>
 - Lin, H., Chua, D., Salomon, M., Shiao, H.C., Hendrickson, M., Plichta E., and Slane, S., Low-Temperature Behavior of Li-Ion Cells, *Electrochem. Solid State Lett.*, 2001, vol. 4, p. A71.
<https://doi.org/10.1149/1.1368736>
 - Ma, M., Tu, J., Yuan, Y., Wang, X., Li, K., Mao F., and Zeng, Z., Electrochemical performance of ZnO nanoplates as anode materials for Ni/Zn secondary batteries, *J. Power Sources*, 2008, vol. 179, p. 395.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.01.026>
 - Xu, K., Nonaqueous Liquid Electrolytes for Lithium-Based Rechargeable Batteries, *Chem. Rev.*, 2004, vol. 104, p. 4303.
<https://doi.org/10.1021/cr030203g>
 - Yamaki, J.-I., Tobishima, S.-I., Hayashi, K., Saito, K., Nemoto, Y., and Arakawa, M., A consideration of the morphology of electrochemically deposited lithium in an organic electrolyte, *J. Power Sources*, 1998, vol. 74, p. 219.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(98\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(98)00067-6)
 - Majumder, S.B., Nieto, S., and Katiyar, R.S., Synthesis and electrochemical properties of LiNi_{0.80}(Co_{0.20-x}Al_x)O₂ (x = 0.0 and 0.05) cathodes for Li ion rechargeable batteries, *J. Power Sources*, 2006, vol. 154, p. 262.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.03.186>
 - Weaving, J., Coowar, F., Teagle, D., Cullen, J., Dass, V., Bindin, P., Green, R., and Macklin, W., Development of high energy density Li-ion batteries based on LiNi_{1-x-y}Co_xAl_yO₂, *J. Power Sources*, 2001, vol. 97–98, p. 733.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00700-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00700-5)
 - Lee, K.K., Yoon, W.S., Kim, K.B., Lee, K.Y., and Hong, S.T., Characterization of LiNi_{0.85}Co_{0.10}M_{0.05}O₂ (M = Al, Fe) as a cathode material for lithium secondary batteries, *J. Power Sources*, 2001, vols. 97–98, p. 308.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00516-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00516-X)
 - Kostecki, R. and McLarnon, F., Local-Probe Studies of Degradation of Composite LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ Cathodes in High-Power Lithium-Ion Cells, *Electrochem. Solid-State Lett.*, 2004, vol. 7, p. A380.
<https://doi.org/10.1149/1.1793771>
 - Bang, H. J., Joachin, H., Yang, H., Amine, K., and Prakasha, J., Contribution of the Structural Changes of LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ Cathodes on the Exothermic Reactions in Li-Ion Cells, *J. Electrochem. Soc.*, 2006, vol. 153, p. A731.
<https://doi.org/10.1149/1.2171828>
 - Тусеева, Е.К., Кулова, Т.Л., Скундин, А.М. Влияние температуры на поведение электродов из титаната лития. *Электрохимия*. 2018. Т. 54. С. 1135. [Tuseeva, E.K., Kulova, T.L., and Skundin, A.M., Temperature Effect on the Behavior of a Lithium Titanate Electrode, *Russ. J. Electrochem.*, 2018, vol. 54, p. 1186.]
<https://doi.org/10.1134/S0424857018140098>
<https://doi.org/10.1134/S1023193518140082>
 - Loghavi, M.M., Mohammadi-Manesh, H., and Eqra, R., LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ coated by chromium oxide as a cathode material for lithium-ion batteries, *J. Solid State Electrochem.*, 2019, vol. 23, p. 2569.
<https://doi.org/10.1007/s10008-019-04342-1>
 - Luo, W., Liu L., Li, X., Yu, J., and Fang, C., Templated assembly of LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂/graphene nano composite with high rate capability and long-term cyclability for lithium ion battery, *J. Alloys Comp.*, 2019, vol. 810, article No. 151786.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151786>
 - Liang, M., Sun, Y., Song, D., Shi, X., Han, Y., Zhang, H., and Zhang, L., Superior electrochemical performance of quasi-concentration-gradient LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ cathode material synthesized with multi-shell precursor and new aluminum source, *Electrochim. Acta*, 2019, vol. 300, p. 426.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.01.125>
 - Кулова, Т.Л. Влияние температуры на обратимые и необратимые процессы при интеркаляции лития в графит. *Электрохимия*. 2004. Т. 40. С. 1221. [Kulova, T.L., Effect of Temperature on Reversible and Irreversible Processes during Lithium Intercalation in Graphite, *Russ. J. Electrochem.*, 2004, vol. 40, p. 1052.]
<https://doi.org/10.1023/B:RUEL.0000046490.73990.c3>
 - Тусеева, Е.К., Кулова, Т.Л., Скундин, А.М., Галеева, А.К., Курбатов, А.П. Влияние температуры на поведение электродов из феррофосфата лития. *Электрохимия*. 2019. Т. 55. С. 329. [Tuseeva, E.K., Kulova, T.L., Skundin, A.M., Galeeva, A.K., and Kurbatov, A.P., Temperature Effects on the Behavior of Lithium Iron Phosphate Electrodes, *Russ. J. Electrochem.*, 2019, vol. 55, p. 194.]
<https://doi.org/10.1134/S0424857019020154>
<https://doi.org/10.1134/S1023193519020149>