ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА **24.1.045.01**, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ **ФГБУН Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН**, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от **28 октября 2026 г. № 14**

о присуждении ***Бороздину Алексею Вячеславовичу***,

гражданину Российской Федерации,

ученой степени кандидата **химических** наук

Диссертация «Электродные процессы на границе алюминия с хлоралюминатной ионной жидкостью на основе гидрохлорида триэтиламина» по специальности 1.4.6. Электрохимия принята к защите **15 июля 2026 г., протокол № 5**, диссертационным советом 24.1.045.01, созданным на базе Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук (ИВТЭ УрО РАН), 620066, г. Екатеринбург, ул. Академическая, д. 20; приказ № 105/нк от 11.04.2012.

Соискатель Бороздин Алексей Вячеславович, 25 августа 1998 года рождения, в 2022 г. окончил ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»; в 2026 г. окончил аспирантуру ИВТЭ УрО РАН; работает **младшим научным сотрудником** лаборатории химических источников тока ИВТЭ УрО РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории химических источников тока ИВТЭ УрО РАН.

Научный руководитель – доктор химических наук ***Елшина Людмила Августовна,*** ведущий научный сотрудник лаборатории химических источников тока ИВТЭ УрО РАН.

Официальные оппоненты:

Кулова Татьяна Львовна, доктор химических наук, заведующий лабораторией процессов в химических источниках тока Института физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН,

Никитин Вячеслав Сергеевич, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры технологии электрохимических производств ФГАОУ ВО «Уральский

федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», **дали положительные отзывы на диссертацию.**

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», в своём положительном отзыве, подписанном Бурашниковой Мариной Михайловной, доктором химических наук, профессором кафедры физической химии, указала, что диссертация А.В. Бороздина посвящена систематическому исследованию физико-химических свойств низкотемпературных хлоралюминатных ионных жидкостей в широком диапазоне концентраций хлорида алюминия, а также установлению закономерностей электродных процессов на границе алюминия с ними и возможности их использования в качестве электролита алюминий-ионного аккумулятора, что является актуальной задачей для создания источников тока нового поколения.

Соискатель имеет 37 опубликованных работ, по теме диссертации – **23**, в том числе **11 статей** в рекомендованных ВАК рецензируемых научных изданиях, а также 12 публикаций в материалах конференций (вклад соискателя в каждой публикации составляет не менее 40%).

Наиболее значимые научные работы:

1. Borozdin, A.V. Electrochemical behavior of aluminum in triethylamine hydrochloride-aluminum chloride ionic liquid / A.V. Borozdin, P.Y. Shevelin, V.A. Elterman, L.A. Yolshina // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2023. – V. 25. – P. 30543–30552. https://doi.org/10.1039/d3cp03403h

2. Borozdin, A.V. Electrochemical behavior of aluminum in 1-ethyl-3-methylimidazolium chloroaluminate ionic liquids / A.V. Borozdin, P.Y. Shevelin, V.A. Elterman, L.A. Yolshina // Electrochim. Acta – 2024. – V.490. – P. 144265. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144265

3. Borozdin, A.V. Electrode reactions on the aluminum electrode in 1-butyl-3-methylimidazolium chloride chloroaluminate ionic liquid: A comprehensive study / A.V. Borozdin, V.A. Elterman, L.A. Yolshina // Electrochim. Acta – 2024. – V.504. – P.144923. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144923

4. Elterman, V.A. Physicochemical properties of triethylamine hydrochloride-based chloroaluminate ionic liquid / V.A. Elterman, A.V. Borozdin, E.A. Il'ina, L.A. Yolshina // J. Mol. Liq. – 2025. – V.427. – P.127411. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.127411

Положительные отзывы на автореферат прислали:

1. Доктор химических наук ***Гаркушин Иван Кириллович***, профессор кафедры общей и неорганической химии Самарского государственного технического университета. Сделаны замечания:

• Следовало бы добавить в текст автореферата расшифровку обозначения N.

• На рисунке 2 приведен фрагмент диаграммы плавкости, а не фазовой диаграммы.

• Обратимость реакций необходимо указывать двумя стрелками.

2. Доктор химических наук ***Иванов Михаил Григорьевич***, заведующий кафедрой общей химии Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург. Вопросов и замечаний нет.

3. Кандидат химических наук ***Пантелеева Виктория Вячеславовна***, доцент кафедры физической химии Пермского государственного национального исследовательского университета. Задан вопрос:

• Рассчитывали ли емкость ДЭС и коэффициенты диффузии из спектров импеданса?

4. Доктор химических наук ***Кушхов Хасби Билялович***, заведующий кафедрой неорганической и физической химии Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова и доцент той же кафедры кандидат химических наук ***Тленкопачев Мурат Рамазанович***, г. Нальчик:

• Недостаточно подробно обоснован выбор электролита на основе Et_3NHCl.

•Почему анодная плотность тока растет с уменьшением концентрации $AlCl_3$?

•Не приведены РФЭС и РСМА пассивной пленки, образующейся на алюминии.

5. Доктор химических наук ***Плетнев Михаил Андреевич***, заведующий кафедрой химии и химической технологии Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова». Вопросов и замечаний нет.

6. Кандидат физико-математических наук Русанов Борис Андреевич, старший научный сотрудник научно образовательного центра «Расплав» Уральского государственного педагогического университета, г. Екатеринбург:

•Рисунок 2 является не фазовой диаграммой, а диаграммой плавкости.

•Насколько отличаются экспериментальные значения плотности от аддитивных?

•Почему для описания вязкости выбрана модель Фогеля-Таммана-Фульчера?

•Как получены экспериментальные точки для вязкости на рисунке 4?

7. Кандидат химических наук ***Чемезов Олег Владимирович***, доцент кафедры металлургии цветных металлов Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург:

•Не обоснованы причины выбора Et_3NHCl в качестве электролита.

• Почему органический катион не влияет на кинетику электродных процессов.

• Почему Ван-дер-Вальсовые силы преобладают над ион-ионным взаимодействием?

• Почему площади пиков на ДСК кривой нагрева и охлаждения не совпадают?

• Не объяснен механизм обратимой интеркаляции иона $AlCl_4^-$ в структуру углерода.

•N обозначает азот и мольное отношение хлорида алюминия к органической соли.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации. Доктор химических наук Кулова Т.Л. является одним из ведущих специалистов России в области электрохимии и разработки материалов для химических источников тока; кандидат химических наук Никитин В.С. – специалист в области математического моделирования электродных процессов, изучения физико-химических свойств растворов электролитов, электрохимического синтеза пористых структур и порошковых металлов. На кафедре физической химии Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского проводятся исследования физико-химических и электрохимических свойств электролитов, используемых в химических источниках тока, а также протекающих в них электродных процессов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана методика регистрации спектров гигантского комбинационного рассеяния света in situ при наложении электрического потенциала на алюминиевый электрод, что позволяет определять концентрационный профиль в приэлектродном слое электролита в зависимости от поляризации электрода;

предложено объяснение явления анодной пассивации алюминия в хлоралюминатных ионных жидкостях, которое обусловлено образованием осадка хлорида алюминия, блокирующего поверхность электрода;

доказана перспективность применения изученных хлоралюминатных ионных жидкостей в качестве электролитов в алюминий-ионных аккумуляторах на примере лабораторных макетов, электрохимические показатели которых (емкость до 97 $мА \cdot ч \cdot г^{-1}$ при кулоновской эффективности около 98%) не уступают мировым аналогам.

Теоретическая значимость исследования:

доказано, что природа органического катиона в хлоралюминатных ионных жидкостях (структура, количество аминогрупп, длина органического радикала) определяет физико-химические свойства электролита, но практически не влияет на кинетику электродных процессов на границе с алюминием, поскольку катион не принимает в них непосредственного участия, а основным электрохимически активным ионом является анион $Al_2Cl_7^-$;

изложены закономерности изменения физико-химических свойств хлоралюминатной ионной жидкости на основе гидрохлорида триэтиламина в широком диапазоне N (мольного отношения $AlCl_3$/органическая соль): при увеличении N от 0.8 до 2.0 плотность электролита возрастает на 25% из-за образования тяжелых ионов $Al_2Cl_7^-$ взамен $AlCl_4^-$; вязкость уменьшается почти в 3 раза вследствие ослабления межчастичного взаимодействия, что приводит к увеличению коэффициентов диффузии ионов; удельная электропроводность уменьшается по причине снижения концентрации носителей заряда, при этом величины эквивалентной электропроводности остаются практически неизменными;

изучено влияние температуры на физико-химические свойства ионной жидкости $AlCl_3$–Et_3NHCl и установлено, что температурная зависимость плотности носит линейный характер; вязкость описывается уравнением Фогеля-Таммана-Фульчера; удельная электропроводность в аррениусовских координатах линейно уменьшается, как и в случае других исследованных жидкостей; произведение вязкости на эквивалентную электропроводность не зависит от температуры в соответствии с соотношением Вальдена-Писаржевского;

раскрыты особенности электрохимического поведения алюминия в хлоралюминатных ионных жидкостях: скорость его катодного восстановления растет с увеличением концентрации $Al_2Cl_7^-$, тогда как концентрация ионов $AlCl_4^-$ определяет скорость анодного растворения металла.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

определены фрагмент диаграммы плавкости хлоралюминатной ионной жидкости на основе гидрохлорида триэтиламина и величины плотности, вязкости, электропроводности, чисел и коэффициентов переноса, коэффициентов диффузии ионов $Al_2Cl_7^-$ в этой системе, которые могут использоваться в качестве справочных данных;

созданы с использованием найденных оптимальных составов всех изученных электролитов (N=1.65 для $AlCl_3$–EMImCl, N=1.63 для $AlCl_3$–BMImCl и N=1.78 $AlCl_3$–Et_3NHCl) макеты алюминий-ионного аккумулятора, которые показали близкие электрохимические характеристики для всех трех систем и высокую стабильность при токах заряда/разряда до 8C (C – ток необходимый для заряда аккумулятора за один час).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс современных методов аттестации и исследования материалов и электрохимических ячеек: спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния света, растровая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия, дилатометрия, капиллярный метод для измерения вязкости, метод Гитторфа для измерения чисел переноса, электрохимическая импедансная спектроскопия, циклическая вольтамперометрия, хронопотенциометрия, хроноамперометрия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия;

результаты получены на сертифицированном оборудовании (перчаточный бокс UNILAB с атмосферой сухого аргона, Рамановский микроскоп-спектрометр U1000, дифференциальный сканирующий калориметр DSC 204 F1 Phoenix, катетометр В-630, модульная электрохимическая станция AUTOLAB 302N,

аналитические весы GH-202, растровый электронный микроскоп MIRA 3 LMU с системой микроанализа INCA Energy 350, энергодисперсионный спектрометр X–MAX 80, потенциостат-гальваностат Elins);

установлены согласованность экспериментальных результатов, полученных с использованием различных методов исследования, а также их соответствие принятым теоретическим закономерностям.

Личный вклад соискателя: анализ литературных данных; синтез ионных жидкостей, определение их ионного состава и физико-химических свойств; исследование механизма и измерение кинетических параметров электродных реакций; разработка методики изучения концентрационного профиля электролита в приэлектродном слое; обработка и обобщение полученных результатов; выявление закономерностей и формулировка основных выводов, подготовка публикаций.

В соответствии с паспортом специальности «**1.4.6. Электрохимия**» работа направлена на исследование транспортных свойств низкотемпературных хлоралюминатных ионных жидкостей и электродных процессов на границе алюминия с ними для создания алюминий-ионного аккумулятора.

Результаты работы могут быть рекомендованы для использования специалистам, работающим в области исследования электродных процессов, а также разработки и производства аккумуляторов: ФИЦ химической физики имени Н.Н. Семенова РАН (г. Москва), Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Уральский федеральный университет (г. Екатеринбург). АО Верхнеуфалейский завод «Уралэлемент», ОАО «Тюменский аккумуляторный завод».

В ходе защиты диссертации были высказаны критические замечания:

1) Насколько корректно определять энергию активации электрохимической реакции по зависимости константы скорости, а не плотности тока от обратной температуры?

2) При создании макетов алюминий-ионного аккумулятора следует использовать сведения, полученные при исследовании электродных процессов на алюминии.

3) Необходимо протестировать макеты АИА при отрицательных температурах.

Соискатель Бороздин А.В. ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы,

а также критические замечания:

1) Расчёты энергии активации электрохимической реакции были нами проведены двумя методами: по константам скорости и по плотности токов обмена. Полученные величины энергии активации оказались идентичными.

2) Предельные значения зарядных/разрядных токов при циклировании ячеек, определяли из поляризационных кривых, не допуская возникновения пассивации алюминия и роста дендритных осадков.

3) Испытания макетов АИА были проведены при температурах 0, -10, -20, -30 °С. Аккумулятор теряет 10% мощности при 0 °С до 60% при -30°С.

Диссертация Бороздина А.В. представляет научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи, имеющей важное значение для развития электрохимии низкотемпературных ионных жидкостей: изучены физико-химические свойства хлоралюминатных ИЖ на основе гидрохлорида триэтиламина и имидазолия, а также электродные процессы на границе алюминия с этими электролитами, показана эффективность их использования в алюминий-ионных аккумуляторах.

На заседании 28 октября 2026 г. диссертационный совет принял решение: присудить Бороздину А.В. ученую степень кандидата химических наук по специальности 1.4.6. Электрохимия.

При проведении тайного **голосования** диссертационный совет в количестве **19** человек, из них **4** доктора наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из **25** человек, входящих в состав совета, проголосовали: **19** за, **0** против, **0** недействительных бюллетеней.

Заместитель председателя совета
доктор химических наук Ткачева Ольга Юрьевна
Ученый секретарь совета
кандидат химических наук Кулик Нина Павловна
29 октября 2026 г.

Подписи Ткачевой О.Ю. и Кулик Н.П. заверяю

Ученый секретарь ИВТЭ УрО РАН, к.х.н. А.О. Кодинцева