

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального Государственного
Бюджетного Учреждения Науки Институт
химической кинетики и горения им.
В.В. Воеводского Сибирского отделения
Российской академии наук,



А.А. Онищук
«05» октября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального Государственного Бюджетного Учреждения Науки Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук на диссертацию Добрыниной Елизаветы Александровны «Развитие спектроскопии рассеяния Мандельштама-Бриллюэна для биологически значимых материалов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 — «оптика»

Диссертационная работа Добрыниной Е.А. относится к так называемой механобиологии – сравнительно молодой области научных исследований на стыке физики, биологии и медицины. В этой области как инструмент исследования, наряду с другими, сейчас активно используется также рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (РМБ). Основной задачей диссертационной работы является выяснение возможностей спектроскопии РМБ для характеристики биологически значимых материалов: включая водные растворы солей, липиды и белки. В работе исследуются возможные взаимосвязи между гигагерцовым продольным модулем упругости и механическими свойствами материала, а также его молекулярной структурой. Несмотря на большое количество опубликованных в этой области работ, ряд принципиальных вопросов как применения метода, так и интерпретации получаемых результатов остаются невыясненными, поэтому поставленная в работе задача несомненно является **актуальной**.

Новизна исследования состоит в установлении корреляции между найденными концентрационными зависимостями частоты валентных ОН-колебаний и комплексного продольного модуля упругости и уравнением Джонса-Доула для вязкости. Также новой является найденная взаимосвязь между спектрами РМБ насыщенных и ненасыщенных фосфолипидов и изменениями в их конформационной структуре. Новым фактом является обнаружение аналогии в температурной зависимости спектров РМБ мембран эритроцитов и модельных мембран. В работе впервые указано на возможности применения спектроскопии РМБ к исследованию белкового каркаса высушенной ткани.

Практическая значимость работы состоит в существенном расширении сфер возможного применения методов РМБ к исследованию биологически значимых систем – таких как водные растворы солей, липидные мембраны и белки. Полученный автором опыт проведения таких измерений методом РМБ несомненно окажется полезным для других исследователей.

Достоверность полученных в работе результатов не вызывает сомнений в силу тщательности проведения измерений и скрупулезности их описания в тексте диссертации. Результаты основаны на большом объеме экспериментальных данных, для которых была достигнута хорошая воспроизводимость. О достоверности результатов свидетельствует также тот факт, что по теме диссертации автором опубликованы 3 статьи в высокорейтинговых журналах с высоким уровнем рецензирования. Материалы диссертации также неоднократно докладывались на научных конференциях.

Диссертационная работа изложена на 156 страницах, содержит 72 рисунка и одну таблицу. Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы, содержащего 184 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы его цель и задачи, обсуждаются научная новизна и практическая значимость результатов, перечислены выносимые на защиту основные положения, даются сведения об апробации материалов диссертации.

Первая глава является литературным обзором, в котором обсуждаются физические основы и теория РМБ, анализируются известные биофизические применения спектроскопии РМБ. Также здесь рассматриваются известные свойства водных растворов солей из лиотропного ряда Гофмейстера. Затем дается обзор известных из литературы свойств фосфолипидных мембран, в частности, их упругих характеристик. Рассматриваются простые белковые коллагенсодержащие биологические системы, рассматриваются известные эффекты влияния воды на спектры РМБ в условиях большой степени гидратации этих систем. В заключение данной главы описывается постановка задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** описаны теория РМБ и принципы работы и характеристики спектрометров. Приведена схема эксперимента, проанализированы возможности использования различных геометрий рассеяния – рассеяние назад (BS) и рассеяние под углом 90° (90R и 90A). Указывается, что применение геометрии рассеяния 90A позволяет определять латеральную скорость звука и упругий модуль.

В **третьей главе** описываются результаты исследования водных растворов солей из ряда Гофмейстера. Уравнение Джонса–Доула описывает способность солей изменять

макроскопическую вязкость своих водных растворов. В литературе знак и значение коэффициента В для линейного концентрационного члена в этом уравнении часто рассматриваются как мера способности соли к структурообразованию/разрушению. В диссертации с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и РМБ к различным солям из ряда Хофмейстера изучена возможная связь между коэффициентом Джонса–Доула В и микроскопическим динамическим откликом. Установлено, что коэффициент В Джонса–Доула линейно коррелирует с коэффициентами, описывающими концентрационные зависимости средней частоты колебаний ОН-группы (данные КРС) и действительной и мнимой частей гигагерцового модуля упругости (данные РМБ). Этот факт интерпретирован как свидетельство того, что частота колебаний ОН-группы является мерой ионно-индуцированных изменений в водной сетке, которые вызывают изменения как вязкости, так и гигагерцовой релаксации. Деполяризованное неупругое КРС показало, что добавление структурообразующих ионов из ряда Хофмейстера не только изменяет частоту пика релаксации, но и увеличивает низкочастотную часть релаксационной восприимчивости. Показано, что ионно-индуцированное увеличение гигагерцового модуля упругости может быть описано изменениями релаксационной восприимчивости без заметного изменения мгновенного модуля упругости.

Четвертая глава посвящена применению спектроскопии РМБ к исследованию фосфолипидных бислоев в широком диапазоне температур от 90 до 320 К. Исследованы бислои из насыщенных (1,2-димиристоил-sn-глицеро-3-фосфохолина, DMPC) и ненасыщенных (1,2-диолеил-sn-глицеро-3-фосфохолина, DOPC) фосфолипидов, найдены гигагерцовые скорости звука. Причем удалось разделить внеплоскостные и внутривплоскостные (латеральные) фононы. Для фононов обоих типов была обнаружена сходная сильная температурная зависимость скоростей звука. Скорости звука в низкотемпературном пределе были в два раза выше, чем при физиологических температурах, причем значительная часть изменений скорости звука происходит в гелевой фазе. Сделаны предположения о факторах, которые могут обуславливать эти эффекты; к таковым могут быть отнесены, в частности, изменения конформационного состояния цепи и латеральной упаковки молекул.

В **пятой главе** возможности спектроскопии РМБ обсуждаются в применении к исследованию упругого отклика тканей бычьей яремной вены и перикарда. Изучались как образцы, фиксированные диэпоксидом, так и образцы, законсервированные после обработки в спиртовых растворах. Было установлено, что сшивание диэпоксидом приводит к небольшой тенденции к увеличению положения пика для гидратированных

тканей. Вариации положения и ширины пиков, связанные с локальными флуктуациями концентрации воды, уменьшались после обработки диэпоксидом в случае перикарда, но не в случае стенки вены. Также были изучены высушенные образцы, для которых выявлено значительное увеличение положения пика после консервации в спирте. Этот результат свидетельствует о более плотной упаковке фиброзных белков после консервации в спиртовых растворах. Сделан вывод о том, что способность спектроскопии РМБ независимо характеризовать влияние обработки на мгновенный модуль упругости различных компонентов ткани перспективен для ее применения в разработке новых материалов для биоимплантатов.

В шестой главе анализируется влияние воды на параметры спектра РМБ для яичного белка и водного раствора бычьего сывороточного альбумина (BSA). Результаты показали, что при денатурации соответствия между изменениями модуля Юнга и продольного модуля упругости не наблюдается. Характеристикой изученных систем является однако то, что для обоих белков ширина линии РМБ после денатурации возрастает.

Из ознакомления с текстом диссертации можно сделать общий вывод о том, что результаты диссертации полностью обоснованы и подтверждены приведенными в работе экспериментальными данными. При прочтении текста возникло, однако, несколько вопросов и замечаний.

1. На рис. 1.4 для обозначения частей молекулы фосфолипида используется неточная терминология: вместо «фосфат», «глицерин», «насыщенная жирная кислота», «ненасыщенная жирная кислота» следует писать соответственно «фосфатный остаток», «глицериновый остаток», «насыщенный ацильный остаток», «ненасыщенный ацильный остаток». (Отметим, что в некоторых статьях в Википедии также имеет место такая неточность). Также на указанном рисунке отсутствует указание на холиновый остаток.
2. В описании результата 1 на стр. 137 диссертации ничего не говорится о возможной физической природе найденной корреляции между коэффициентом вязкости Джонса-Доула и коэффициентами в линейном члене концентрационных зависимостей действительной и мнимой частей гигагерцового модуля упругости. Из-за этого возникает вопрос о значимости обнаруженного факта.
3. На стр. 138 в описании результата 5 говорится о «липидоподобном характере» температурной зависимости скорости звука выделенных

мембран эритроцитов. Смысл этого термина неясен, следовало бы написать конкретнее, о чем здесь идет речь.

Высказанные замечания имеют либо рекомендательный либо чисто технический характер и не влияют на общую высокую оценку данной работы.

Диссертационная работа Добрыниной Елизаветы Александровны «Развитие спектроскопии рассеяния Мандельштама-Бриллюэна для биологически значимых материалов» заслушана на Объединенном физико-химическом семинаре ИХКГ СО РАН 17 сентября 2026 г., по результатам обсуждения принято решение о положительном отзыве на данную работу.

В целом можно заключить, что диссертационная работа Добрыниной Елизаветы Александровны «Развитие спектроскопии рассеяния Мандельштама-Бриллюэна для биологически значимых материалов» является цельным законченным исследованием, содержит достоверные новые результаты, по своей новизне, актуальности, практической и теоретической значимости соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Е.А. Добрынина заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 — оптика.

Отзыв подготовил доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Химии и физики свободных радикалов ИХКГ СО РАН

 Дзюба С.А.

Контактные данные

Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки

Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского

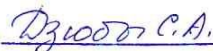
Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

Сайт: <https://www.kinetics.nsc.ru>

Телефон: +7 (383) 330-91-50

Адрес электронной почты: admin@kinetics.nsc.ru

Подпись  удостоверяю

05.10.2026.

