Новый метод дистанционного радиочастотно-акустического исследования жидкостей

Александр В. Крамаренко^{а,*}, Андрей В. Крамаренко^b

^а TREDEX Company Ltd., Украина, 61001, Харьков, а/я 11515 ^bHTV "ХПИ", кафедра общей и неорганической химии, Украина, Харьков, 61002, ул. Кирпичева, 2

В настоящей работе предложен новый метод исследования жидких сред, основанный на обнаруженной нами радиочастотной анизотропии ионного проводника, подвергнутого механическому или акустическому воздействию. Эффект наблюдался в процессе разработки бесконтактного радиочастотного поляриметрического кардиографа. Поворот вектора поляризации радиосигнала с частотой 433.82 МГц после прохождения через область сердца зависел от изменения ускорения крови, проходящей через камеры сердца и крупные сосуды. Выяснилось, что вектор поляризации радиосигнала поворачивается также при прохождении его через 0.9% водный раствор NaCl при любом механическом возмущении внутри раствора, например, возникновении струи или прохождении звуковой волны. Не удалось экспериментально обнаружить значительной разницы между поведением растворов NaCl и KCl, из чего следует, что гидродинамическая селекция ионов эффект, по-видимому, не объясняет. Полученный отклик скорее соответствует процессу изменения намагниченности в спиновых стеклах. Из характера наблюдаемого отклика авторами сделан вывод об обнаружении принципиально нового физического эффекта, открывающего широкие возможности дистанционного измерения характеристик растворов электролитов с помощью поляризованных радиочастотных сигналов.

Ключевые слова: бесконтактная кардиография, вектор поляризации, поляриметрия, водный раствор электролита, времена релаксации, спиновые состояния

1. Вступление

Ещё в 1845 году Майклом Фарадеем было предсказано такое явление как поворот плоскости поляризации линейно поляризованного света в магнитном поле. И когда Джон Керр обнаружил изменение показателя преломления оптического материала, пропорциональный квадрату напряжённости электрического поля, началось широкое использование этого вновь открытого электрооптического эффекта. Необходимым условием для работы ячеек Керра, Поккельса и других было использование некой среды, которая опосредованно изменяет поляризацию проходящего через неё электромагнитного излучения. В терминах радиофизики это можно представить как параметрическое воздействие на систему: передатчик – распространение в среде - приёмник. Следовательно, весьма правдоподобно выглядит гипотеза о возможности обнаружения явления, близкого явлению Фарадея и в радиочастотном диапазоне.

В настоящей работе мы предлагаем совершенно новый метод изучения жидких проводящих сред, основанный на ранее не наблюдавшемся физическом

Email addresses: tredexcompany37@gmail.com (Александр В. Крамаренко), kramarenko@kpi.kharkov.ua (Андрей В. Крамаренко) эффекте радиочастотной анизотропии раствора электролита, подвергнутого механическому или акустическому воздействию. По нашему мнению, метод может быть использован как в фундаментальном физикохимическом эксперименте, так и в самых разных областях индустрии, биологии и медицины, а также, возможно, океанографии и геологии.

Ранее была обнаружена разность потенциалов между точками движущегося с переменным ускорением раствора электролита [1] (переведенная на английский язык аннотация [2], английская версия [3]). Однако там не шла речь о повороте вектора поляризации радиоизлучения.

Эффект, описываемый в настоящей работе, был неожиданно обнаружен в процессе испытания разработанного нами нового типа кардиографа для полностью бесконтактного контроля сердечных сокращений, что важно для оценки состояния человека в случае, если наложение ЭКГ электродов невозможно или неудобно.

В начале работы по проектированию поляриметрического кардиографа механизм возникновения поворота вектора поляризационного рассеяния (ВПР, в нашем случае действительная часть вектора Джонса) среды [4] предполагался простым и очевидным. Ведь если миокард и отходящие от него крупные сосуды деформируются и поворачиваются в период систолы (этот

^{*}Основной корреспондент



Рис. 1: Упрощённая блок-схема прибора для оценки отклонения вектора поляризации радиочастотного сигнала. 1 – передатчик 433.82 МГц, –12 дБм, поляризация линейная, непрерывное излучение; 2 – передающая антенна; 3 – исследуемый объект; 4 – диэлектрический материал; 5 – приёмные квадратурные антенны с ортогональной ориентацией; 6 – радиочастотный усилитель канала Х; 7 – радиочастотный усилитель канала Y; 8 – амплитудный логарифмический детектор канала Х; 9 – амплитудный логарифмический детектор канала Y; 10 – инструментальный операционный усилитель; 11 – регистрирующее устройство (по оси X время, по оси Y отклонение ВПР). Антенны показаны как полуволновые диполи Герца, понятно, что их реальная конфигурация будет другой. Передающая антенна отклонена на 45°относительно приемных.

факт давно и достоверно установлен динамическими исследованиями сердечной деятельности [5]), то и проходящий через область сердца поляризованный радиосигнал будет изменять поляризацию, потому что структура неоднородных тканей смещается и поворачивается. Т.е. ожидаемый поворот вектора поляризации должен был быть синхронизирован с «внешней баллистикой» сердца.

Линейно поляризованный радиочастотный сигнал передатчика регистрировался приёмником с двумя антеннами, имеющими ортогональную поляризацию. Т.е. был реализован мультистатический радиолокатор непрерывного излучения, работающий «на просвет» околосердечной области.

Выходной низкочастотный сигнал, пропорциональный разности амплитудных значений для каналов с поляризацией X и Y, подавался на регистрирующее устройство (см. рис. 1). Таким образом, на графике по оси ординат откладывалось значение проекции ВПР на плоскость, перпендикулярную распространению волны, а развёртка во времени по оси абсцисс позволяла оценивать динамику процесса.

Нами было успешно зарегистрировано изменение поляризации радиочастотного сигнала UHF диапазона, бесконтактным методом была получена ожидаемая кардиограмма. Сигнал регистрировался с минимумом артефактов и помех. Поляриметрические кардиограммы записывались синхронно со стандартной ЭКГ (рис. 2).

Однако кривые осциллограмм, полученных поляриметрическим способом, противоречили изначальной гипотезе. Они были более продолжительными, чем ЭКГ, начинались намного раньше, чем ожидалось, и заканчивались позже, что не поддавалось объяснению.



Рис. 2: Синхронная запись поляриметрической кардиограммы (РСG) и стандартной электрокардиограммы (ЕСG (V3), ЕСG (V5))

Хорошее совпадение сигнала поляриметрической кардиограммы наблюдалось только с временными метками внутрисердечной (№!) гемодинамики. Получалось, что поворот вектора поляризации связан не с «внешней», а «внутренней» баллистикой сердца, т. е. движением крови внутри него и примыкающих крупных сосудах.

У авторов появилась гипотеза, что положение вектора поляризации радиосигнала, прошедшего через околосердечную область, зависит от электрических характеристик среды, т.е. крови, через которую он проходит. И эти характеристики изменяются в процессе систола/диастола.

Разумеется, поворот вектора поляризации радиоизлучения неподвижной и движущейся стационарно кровью не меняется со временем. Изменения могут наступать только в процессе разгона/торможения, т. е. при нестационарном движении. С этим предположением согласуется появление отклонения ВПР тогда, когда миокард начинает сокращаться, но кровь ещё практически неподвижна. Более того, сигнал поляриметрической кардиограммы фиксируется и после сердечного сокращения, когда имеется только обратный ток крови по аорте и легочной артерии с закрытием клапанов и резким торможением потока.

Т.е. мы вправе предположить, что изменение положения вектора поляризации обусловлено не только (и не столько) смещениями и поворотами сердца, но и изменением свойств движущейся крови как раствора электролитов.

Авторы настоящей работы первоначально предполагали механизм возникновения анизотропии в растворе таким: при движении жидкости с переменным ускорением в сильных электролитах вследствие неодинаковых масс, радиусов ионов, а также отличающихся размеров оболочек гидратированных ионов, движущийся растворитель неодинаково воздействует на катионы и анионы, а, следовательно, должно возникать смещение ионов одного знака относительно противоположно заряженных. В свою очередь смещение противоположно заряженных ионов друг относительно друга должно вызывать образование параллельно ориентированных статистических дипольных структур в растворе. Тогда, при прохождении радиочастотного сигнала через движущийся с переменным ускорением раствор, вектор поляризации будет отклоняться от начального значения вследствие разного коэффициента затухания ортогонально поляризованных волн.

Однако наши дальнейшие эксперименты и расчёты показали несостоятельность такого подхода.

2. Эксперимент

Для экспериментальной проверки гипотезы зависимости ВПР от движения крови как проводящей среды нами была собрана установка (рис. 3), где между передающей и приёмной антеннами располагалась ёмкость с изотоническим раствором хлорида натрия. Раствор имел температуру окружающей среды +20°С. Внутри ёмкости свободно располагался тонкий полистироловый диск, насаженный на длинный толкатель из диэлектрического материала. Диск смещался в растворе под влиянием внешней силы, передаваемой через толкатель.

При заполнении ёмкости изотоническим раствором NaCl любое смещение диска всегда вызывало появление на выходе детектора высокоамплитудного сигнала. Следует заметить, что этот эксперимент легко реализуем и отличается высокой повторяемостью результатов. Удивительно, что такой легко наблюдаемый эффект реально существует, и он мог остаться незамеченным с момента изобретения радиосвязи. Осциллограммы процесса представлены на рисунках 4 и 5.

Амплитуда выходного сигнала была тем больше, чем больше было ускорение и чем выше концентрация



Рис. 3: Схема экспериментальной установки. Слева передающая укороченная антенна в чехле из радиопоглощающего материала, справа приёмная щелевая квадратурная антенна. Взаимная ориентация поляризаций антенн наклонена на 45°

	\sim
manan /	
~	

Рис. 4: Отклонение вектора поляризации при мягком толчке диска (начало и конец действия силы помечены стрелками). При эксперименте с подкрашиванием раствора было видно, что струи, обтекающие диск, движутся в обратном направлении с более высокой скоростью, чем сам диск. Сетка имеет минимальное деление 40 мсек по горизонтали и примерно 4°поворота вектора по вертикали (шкала по вертикали, к сожалению, нелинейная)



Рис. 5: То же при резком ударе по деревянному толкателю (характер течений отличался от предыдущего наблюдения)

NaCl. Однако с дальнейшим ростом концентрации отклик на движение диска проходил через максимум и при приближении к насыщению раствора уменьшался и для насыщенного раствора перестал наблюдаться. Здесь можно сделать предположение, что описан-



Рис. 6: Слева показан отклик системы на повторяющийся акустический импульс длительностью 1 мсек. Справа длительность импульсов и частота их посылок увеличена. Наглядно виден затухающий колебательный процесс, обусловленный, возможно, эхом в резервуаре. Верхний луч – эпюры на входе гидрофона, нижний – отклонение вектора поляризации. Подведенная к акустическому излучателю электрическая энергия импульса 1 · 10⁻³ Дж, направление распространения звука отклонено на 45°относительно вектора поляризации сигнала передатчика. Эффект удавалось уверенно наблюдать до значений подведенной энергии импульса 1 · 10⁻⁶ Дж

ный эффект регистрируется нашей аппаратурой только в зоне достаточно концентрированного, но ненасыщенного раствора. Опыты с перестройкой радиочастот не проводились, т.к. изначальный выбор предполагал соответствие длины полуволны радиосигнала линейным размерам сердца и крупных сосудов.

Существенных отличий в отклике растворов NaCl и KCl приблизительно одинаковых молярных концентраций на движение диска экспериментальной установки (рис. 3) обнаружить не удалось.

Для проверки гипотезы о существовании акустического варианта обнаруженного эффекта производились записи с подачей нормированного по уровню и длительности сигнала на гидрофон, находящийся в ёмкости с изотоническим раствором хлорида натрия. С выхода операционного усилителя были записаны соответствующие осциллограммы (рис. 6).

После перестройки аппаратуры с целью расширения полосы пропускания до нулевой частоты были обнаружены совершенно неожиданные эффекты. Реакция раствора на проходящий фронт акустической волны вопреки ожиданиям была очень длительной, т. е. фиксировался несомненный эффект долговременной (по отношению к типичным временам релаксации растворителя) «памяти» системы. Кроме того, после быстрого отклонения вектора поляризации при прохождении акустической волны, его поворот продолжался, анизотропия всего объёма нарастала (см. рис. 7). Рост анизотропии происходил в течение десятков секунд после импульса. Отклонение вектора поляризации проходило через максимум и возвращалось к исходным значениям (до импульса) через 30 секунд и более. Поскольку для раскачки гидрофона был использован оконечный каскад, работающий в ключевом режиме, это нельзя объяснить, например, неконтролируемым шумом гидрофона в паузах между импульсами.



Рис. 7: Слева – реакция системы на сигнал, описываемый функцией Хевисайда. Верхний луч – напряжение на входе гидрофона, нижний – отклонение вектора поляризации. Продолжительность фрагмента записи 2.5 с. Полоса пропускания усилителей не ограничена снизу (усилители постоянного тока). Легко наблюдать, что после быстрого поворота вектора поляризации продолжается вращение в том же направлении. Справа – фрагмент записи 5 с, безуспешная попытка изменить характер поворота вектора поляризации кратковременным включением дополнительного более мощного передатчика (помеха видна на нижнем луче осциллографа)

Кроме того, такое же поведение (рис. 5) наблюдалось нами и в первоначальном варианте установки с диском (рис. 3).

Для исключения влияния «накачки» высокочастотной энергии передатчика на исследуемый объект была предпринята попытка повлиять на эффект кратковременным облучением раствора другим, более мощным (+20 дБ) передатчиком. Частота его сигнала была той же, угол поляризации отклонен как от угла приемной, так и передающей рабочих антенн установки.

Воздействие более мощного передатчика никак не повлияло на характер изменения отклонения вектора поляризации со временем (рис. 7). Очевидно, что «влиянием наблюдателя», т. е. изменением структуры исследуемого объекта под влиянием микромощного высокочастотного радиосигнала, можно пренебречь.

Наши эксперименты не могут пока дать количественную оценку зарегистрированному феномену, внешне сходному с эффектами Керра и Покельсона. В основных физических справочниках (например, [6]) его обнаружить не удалось (Sic!). Однако влияние движения электролита с переменным ускорением на поляризацию проходящего через него радиочастотного сигнала можно считать, по мнению авторов, экспериментально доказанным.

Резюмируя произведенные наблюдения, мы должны отметить следующие экспериментальные факты:

 Поворот вектора поляризационного рассеивания не наблюдался при возбуждении механического движения в чистой воде. С ростом концентрации электролита он нарастает, однако при приближении к насыщению раствора NaCl отклик уменьшался и для насыщенного раствора практически перестал наблюдаться на имеющейся аппаратуре (здесь необходимо учитывать несовершенство первой экспериментальной установки, т.е. при более высоких характеристиках аппаратуры этот вывод может быть скорректирован).

- Эксперимент с раствором КСІ, имеющим молярную концентрацию 0.157 моль/л (близкую к таковой для изотонического раствора NaCl), не выявил экспериментально заметной разницы в отклике.
- Величина возникшей радиочастотной анизотропии зависит от энергии фронта проходящей через раствор электролита акустической волны и не зависит от мощности радиочастотного передатчика.
- Анизотропия при прохождении фронта волны возникает практически безынерционно, т.е. на имеющейся установке наблюдаемые времена были менее 50 мкс, и они, скорее всего, много меньше этой величины.
- 5. Анизотропия после прохождения фронта сохраняется в течение не менее десятков секунд, нарастая со временем (см. рис. 6, 7). Это оказалось совершенно неожиданным. Временной ход изменения анизотропии не изменяется при любых манипуляциях с мощностью и/или модуляцией радиосигнала (рис. 7). Таким образом, зарегистрирован своеобразный эффект «памяти», который требует непротиворечивого объяснения.
- 6. Прохождение обратного фронта акустической волны устраняет возникшую анизотропию (рис. 7).

3. Обсуждение

Нами была предпринята попытка количественно описать наблюдаемый эффект с точки зрения разницы в гидродинамическом поведении имеющихся в растворе ионов. Мы рассмотрели простейшую парную модель – катион и анион, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, погруженные в бесструктурную среду с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 78.54$. Поток растворителя движется с переменным ускорением, на каждый ион действуют две силы – кулоновская сила притяжения к иону противоположного заряда и гидродинамическая сила со стороны движущегося растворителя, увлекающего ион за собой.

Мы оценили ускорение потока растворителя, при котором достигается равновесие между кулоновской сближающей силой и гидродинамическими силами, отдаляющими ионы друг от друга. Начальные условия подбирались так, чтобы в момент равновесия это расстояние приблизительно соответствовало среднему расстоянию между ионами Na⁺ и Cl⁻ в 0.9% растворе NaCl (≈4.7 нм). Для негидратированных ионов, по нашим расчетам, момент равновесия наступил бы при ускорении растворителя $a_S \approx 8.4 \cdot 10^{12}$ м/с². Для гидратированных ионов необходимое ускорение составило бы $a_S \approx 7.7 \cdot 10^{11}$ м/с².

Число гидратации для катиона Na⁺ было взято равным 16.6 [7], для аниона – 1.5 [8]. Коэффициенты диэлектрического трения ионов были взяты из [9]. Эти коэффициенты для иона калия и хлорид-иона в воде весьма близки друг к другу в интервале температур, по крайней мере, от +5°C до +25°C [10, 11]. Поэтому отклик от раствора хлорида калия (при прочих равных условиях) должен был быть много меньше, чем от раствора хлорида натрия, если бы предложенное нами объяснение эффекта (с точки зрения гидродинамики) было бы близко к реальности.

Во-первых, полученные огромные значения ускорений свидетельствуют о несостоятельности простой континуальной гидродинамической модели двух частиц, в которой отсутствует потенциал средней силы. Для дальнейшей разработки гидродинамической модели, возможно, плодотворным будет применение новых теоретических подходов, способных описывать нестационарный поток жидкости на микроскопическом уровне, например так называемых теорий сложных жидкостей, описанных в [12].

Во-вторых, очень вероятно, что простое гидродинамическое описание наблюдаемого эффекта даже в рамках более совершенной модели не сможет корректно описать явление остаточной анизотропии - «памяти», чего не должно было бы возникать, т. е. осциллограмма (при открытом входе осциллографа) показывала бы обыкновенную кривую дифференцирующей цепи. Учитывая тепловое движение в растворе, вряд ли следует предполагать наличие каких-то молекулярных колебательных процессов, обусловливающих такую длительную «память» - они, несомненно, должны были быть нивелированы тепловым шумом достаточно быстро. Более того, суммарная энергия теплового движения молекул воды неизмеримо больше энергии, вносимой в систему акустическим импульсом. Энергия импульса длительностью 50 мкс, излученного гидрофоном мощностью 1 Вт, оценивалась величиной порядка 50 мкДж. Фронт такой волны, по нашим данным, поворачивает поляризационный вектор рассеяния примерно на 10°. Если предположить, что анизотропия вызвана именно ориентацией дипольных моментов молекул воды, то интегральный годограф их теплового движения, в изотропной среде представляющий собой сферу, должен стать эллипсоидом со сколько-нибудь значимой разностью большой и малой полуоси. Трудно надеяться, что акустический импульс имеющегося гидрофона способен внести достаточную для этого энергию, если учесть, что энтальпия воды при +20°С равна 84 кДж/кг (относительно тройной точки), а масса раствора в нашем эксперименте составляла около 2 кг. Оценки энергий акустического импульса и теплового движения воды отличаются приблизительно на 9 порядков.

Таким образом, по нашему мнению, наиболее вероятный физический процесс, который остается пригодным для объяснения наблюдаемых гигантских времен релаксации – это спин-спиновое взаимодействие моментов ядер атомов водорода молекул воды [13]. По нашему мнению, наиболее близким к наблюдаемому нами отклику (по изменению во времени) является процесс намагничивания спинового стекла [14]:



Рис. 8: Намагничивание *М* спинового стекла как функция времени после включения и выключения магнитного поля

Используя свойства спинового стекла как прототип, можно сделать предположение, что поведение исследуемого в наших экспериментах раствора может быть описано моделью Эдвардса – Андерсона [15]. Т. е. в среде распространения акустической волны имеется не случайное направление спинов, а вырождение по различным спиновым конфигурациям, причем число возможных метастабильных состояний бесконечно велико при очень большом времени релаксации. Авторы не могут пока однозначно соотнести эти состояния с имеющимися физическими объектами в исследуемом растворе, будь то гидратированные ионы, отдельные молекулы воды либо их кластеры. Разумеется, здесь потребуется исчерпывающее теоретическое обоснование. Некоторую надежду на решение этого вопроса дает известный экспериментальный факт возможности разделения двух спиновых изомеров воды в весьма специфических условиях [16].

4. Выводы

- Предполагаем, что поворот поляризации радиочастотного сигнала обусловлен спиновыми эффектами, возникающими под действием внешней силы.
- Можно надеяться, что эффект найдет широкое применение в биофизике и медицине с учетом потребности в бесконтактных методах исследования. Особенно перспективным можно предполагать мониторинг состояния оператора (водителя автомобиля), где наибольшее значение имеет частота сердечных сокращений и интегральная оценка насосной функции сердца.

- Построить полную модель и дать точные теоретические обоснования в полном объёме авторы пока не готовы, однако получение экспериментальной зависимости отклонения ВПР от величины второй производной скорости движения электролита вполне реализуемо.
- 4. Несмотря на несовершенство используемой аппаратуры и алгоритмов обработки сигнала, практическое применение обнаруженного эффекта возможно, так как предлагаемый датчик будет выполнять функции «конечного автомата» (т. е. инвариантное во времени перекодирование). Эталонных данных в постоянном запоминающем устройстве вполне достаточно для его работы.
- Кроме применения в медицине, полностью бесконтактный метод контроля движущихся по трубопроводам жидкостей, обнаружение недопустимых вибраций, турбулентностей и т.п., по мнению авторов, может быть перспективным для промышленного применения.
- 6. Особенно интересным может быть использование поляриметрического датчика в качестве гидрофона для морской воды. В таком случае устраняется фазовый переход на пути следования звуковых волн из среды, в которой они распространяются, к чувствительному элементу, как это происходит во всех существующих микрофонах. Не исключено, что чувствительность и селективность гидроакустических станций удастся повысить.
- Измерение угла радиочастотной поляризации по мере прохождения через ткани организма единичного короткого акустического импульса позволит разработать принципиально новый метод моноимпульсной ультразвуковой интроскопии.

5. Благодарности

Выражаем благодарность заведующему кафедрой высшей математики Харьковского национального университета радиоэлектроники проф. А. Г. Неруху, доценту кафедры органической химии и биотехнологии Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" И. И. Мельнику, научному сотруднику Института физики микроструктур Российской академии наук А. Н. Нечаю за плодотворное обсуждение результатов и выводов работы.

Список литературы

- [1] A. V. Kramarenko, G. P. Kulemin, A. M. Savchuk, Gemodinamicheskij komponent jelektrokardiogrammy, Biofizika 41 (1996) 686-694. URL: http://www.tredex-company.com/ru/ gemodinami-eskij-komponent-elektrokardiogrammy.
- [2] A. V. Kramarenko, G. P. Kulemin, A. M. Savchuk, 1996, The hemodynamic component of an electrocardiogram, URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8924470.

- [3] A. V. Kramarenko, G. P. Kulemin, A. M. Savchuk, 1996, Hemodynamic contribution to human ecg, URL: http://www.tredex-company. com/sites/default/files/images/1996.pdf.
- [4] V. N. Tatarinov, S. V. Tatarinov, L. P. Ligthart, Vvedenie v sovremennuju teoriju poljarizacii radiolokacionnyh signalov. Poljarizacija ploskih jelektromagnitnyh voln i ee preobrazovanija, volume 2 of *Polarizacija radiovoln*, Izdatelstvo Tomskogo universiteta, 2006. URL: https:// www.twirpx.com/file/2298809.
- [5] V. M. Shipulin, S. L. Andreev, J. J. Vecherskij, E. P. Gordov, Ispol'zovanie lazerov v serdechno-sosudistoj hirurgii: ot jeksperimenta k praktike, STT, 2010.
- [6] J. Rumble (Ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 100th Edition, CRC Press, 2019.
- [7] V. M. Ivanov, K. A. Semenenko, G. V. Prohorova, E. F. Simonov, Natrij, Analiticheskaja himija jelementov, Nauka, 1986. URL: http: //chemteq.ru/assets/files/books/analytical/0065.djvu.
- [8] P. R. Smirnov, Structural parameters of the nearest surrounding of halide ions in the aqueous electrolyte solutions, Russian Journal of General Chemistry 83 (2013) 1469–1481. URL: https://doi.org/10. 1134/S107036321308001X. doi:10.1134/S107036321308001X.
- [9] S. Koneshan, R. M. Lynden-Bell, J. C. Rasaiah, Friction coefficients of ions in aqueous solution at 25 °c, Journal of the American Chemical Society 120 (1998) 12041-12050. URL: https://doi.org/10.1021/ja981997x. doi:10.1021/ja981997x. arXiv:https://doi.org/10.1021/ja981997x.
- M. Ueno, A. Yoneda, N. Tsuchihashi, K. Shimizu, Solvent isotope effect on mobilities of potassium and chloride ions in water at high pressure. ii. a low temperature study, The Journal of Chemical Physics 86 (1987) 4678–4683. URL: https://doi.org/10.1063/1.452708. doi:10. 1063/1.452708.arXiv:https://doi.org/10.1063/1.452708.
- M. Ueno, N. Tsuchihashi, K. Shimizu, Solvent isotope effect on mobilities of potassium and chloride ions in water at high pressure. iii. a high temperature study, The Journal of Chemical Physics 92 (1990) 2548–2552. URL: https://doi.org/10.1063/1.457947. doi:10. 1063/1.457947.arXiv:https://doi.org/10.1063/1.457947.
- [12] B. Eisenberg, Mass action in ionic solutions, Chemical Physics Letters 511 (2011) 1–6. URL: http://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/S0009261411006269. doi:10.1016/j.cplett.2011. 05.037.
- [13] J. Casanueva, J. S. Fabiàn, E. Dièz, A. Esteban, Nmr spin-spin coupling constants in water molecule: equilibrium and rovibrational values, Journal of Molecular Structure 565-566 (2001) 449 - 454. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/ pii/S0022286000009042. doi:https://doi.org/10.1016/ S0022-2860(00)00904-2.
- [14] V. Kincel', Spinovye stekla kak model'nye sistemy dlja nejronnyh setej, Usp. fiz. nauk 152 (1987) 123-131. URL: https://ufn.ru/ru/ articles/1987/5/d/. doi:10.3367/UFNr.0152.198705d.0123.
- [15] S. F. Edwards, P. W. Anderson, Theory of spin glasses, Journal of Physics F: Metal Physics 5 (1975) 965–974. URL: https://doi.org/10.1088% 2F0305-4608%2F5%2F5%2F017. doi:10.1088/0305-4608/5/5/017.
- [16] V. I. Tikhonov, A. A. Volkov, Separation of water into its ortho and para isomers, Science 296 (2002) 2363-2363. URL: https://science.sciencemag.org/ content/296/5577/2363. doi:10.1126/science.1069513. arXiv:https://science.sciencemag.org/content/296/5577/2363.full.pdf.