

# 11 Определение магнитного момента ядра $^{23}\text{Na}$ при использовании ЯМР-спектрометра, регистрирующего сигналы от двух ядер одновременно

© Ю.И. Неронов

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева,  
190005 Санкт-Петербург, Россия  
Университет ИТМО,  
197101 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: yineronov@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2020 г.  
В окончательной редакции 12 июня 2020 г.  
Принято к публикации 20 июня 2020 г.

Представлены экспериментальные результаты определения отношения частот резонансов протонов воды и ядер  $^{23}\text{Na}$  для растворов NaCl при концентрациях от 0.1 до 0.5 g на 100 g  $\text{H}_2\text{O}$ . Сигналы от протонов воды и ядер натрия регистрировались одновременно, что позволило минимизировать случайные и систематические погрешности в определении отношения частот резонанса  $f(\text{H}_2\text{O})/f(^{23}\text{Na}^+)$  до нескольких единиц девятого знака. При экстраполяции содержания NaCl в воде к нулевым концентрациям для одиночных ионов в воде было определено:  $f(\text{H}_2\text{O})/f(^{23}\text{Na}^+) = 3.780\,463\,993(25)$ . При использовании известных данных для магнитного момента протона, данных для экранирования протонов в воде и экранирования ядер ионов натрия был вычислен магнитный момент ядер натрия:  $\mu(^{23}\text{Na}) = 2.217\,5065(55)$ . Обсуждается сопоставление нового результата с данными других авторов.

**Ключевые слова:** ЯМР-спектрометр, натрий, ядерный магнитный момент ядра натрия.

DOI: 10.21883/JTF.2021.01.50279.154-20

## Введение

Прецизионные данные о магнитных моментах легчайших ядер (дейтерия, трития и гелия-3) были получены методом ядерного магнитного резонанса с использованием газообразных образцов, для которых доступны более точные вычисления поправок на электронное экранирование ядер [1–5]. Такие элементы, как натрий, не образуют газообразных соединений. Соли натрия хорошо растворяются в воде, и ядерные магнитные моменты ионов  $^{23}\text{Na}^+$  в водной среде позволяют регистрировать интенсивные ЯМР сигналы. Магнитные моменты ядер натрия известны для семи изотопов: для стабильного ядра  $^{23}\text{Na}$  и шести нестабильных  $^{26-31}\text{Na}$ , и планируется использование короткоживущих изотопов натрия для расшифровки биохимических процессов [6]. Причем данные о магнитном моменте  $\mu(^{23}\text{Na})$  имеют особую значимость [6]: их используют как основу для вычисления  $\mu(^{26-31}\text{Na})$ .

Частоту ЯМР сигнала от ионов  $^{23}\text{Na}^+$  водного раствора можно использовать для прецизионного определения  $\mu(^{23}\text{Na})$ , если при этом магнитное поле будет зарегистрировано с требуемой высокой точностью. По рекомендации экспертов CODATA [1] прецизионная оценка магнитного поля также определяется регистрацией частоты ЯМР сигнала, причем от протонов воды и с использованием фундаментальных физических констант:  $\mu_p$  — магнитного момента протона и  $\sigma(\text{H}_2\text{O})$  — коэф-

фициент экранирования протона в воде [1,7,8]. Следовательно, магнитный момент ядра  $^{23}\text{Na}$  может быть вычислен по соотношению:

$$\mu(^{23}\text{Na}) = \mu_p \cdot [f(^{23}\text{Na})/f(\text{H}_2\text{O})] \cdot [I(^{23}\text{Na})/I_p] \times \{ [1 - \sigma(\text{H}_2\text{O})] / [1 - \sigma(^{23}\text{Na}^+)] \}, \quad (1)$$

где отношение спинов является строго квантованной величиной:  $I(^{23}\text{Na})/I_p = 3$ ;  $f(^{23}\text{Na})/f(\text{H}_2\text{O})$  — отношение частот резонанса при минимальных концентрациях солей натрия в воде;  $\sigma(\text{H}_2\text{O})$  и  $\sigma(^{23}\text{Na}^+)$  — коэффициенты экранирования ядер. При этом, поскольку обе частоты должны регистрироваться в строго одном и том же магнитном поле, то лучшим способом минимизировать случайные и систематические погрешности, связанные с изменением магнитного поля, является регистрация сигналов от протонов и ядер  $^{23}\text{Na}$  одновременно.

Режим с одновременной двухканальной регистрацией сигналов от двух ядер не доступен на серийных ЯМР-спектрометрах, где переключение на другое ядро требует технического перерыва для настройки на другой резонанс LC-контура приемной цепи. При этом, как правило, изменяется температура образца и могут возникнуть сдвиги магнитного поля. В широко распространенных серийных ЯМР-спектрометрах смена образцов осуществляется с помощью сжатого воздуха и, следовательно, требуется контроль дополнительного нагрева ампулы из-за нагрева воздуха при его сжатии.

Структура воды имеет ряд особенностей и, в частности, экранирование протонов в воде имеет достаточно большую зависимость от температуры. Температура лабораторного помещения, как правило, изменяется в течение рабочего дня на несколько градусов. Соответственно частота резонанса протонов воды (или дейтронов в случае  $D_2O$ ) будет изменяться на несколько единиц восьмого знака.

У серийных ЯМР-спектрометров со сверхпроводящим магнитом приемная резонансная индуктивность имеет два витка, которые должны иметь седлообразно форму. Если магнитное поле формирует электромагнит, как в настоящей работе, то применяют более эффективную по чувствительности соленоидальную индуктивность, а число витков увеличивают до  $\sim 10$  или более, и тем самым существенно уменьшают потерю чувствительности из-за уменьшения поля.

## 1. Спектрометр и образцы

В настоящей работе в качестве приборной основы спектрометра был использован электромагнит с полем 2.14 Т, который ранее применяли [9] для определения магнитного момента и изотопных сдвигов ядер трития. При малых концентрациях NaCl в воде сигнал от протонов на три-четыре порядка превышает по интенсивности сигнала от ядер  $^{23}Na^+$ . Поэтому ампулы помещали в приемную индуктивность спектрометра, специально изготовленную с максимальной добротностью для частоты  $f(^{23}Na^+) \approx 24$  МГц и соответственно с наибольшим усилением более слабого сигнала. Сигнал от протонов [ $f(H_2O) \approx 91$  МГц] регистрировался той же самой приемной индуктивностью, что и сигналы от ядер натрия. Для этого в модуле согласования использовалась дополнительная малая индуктивность, которая по эквивалентной схеме оказывалась параллельной к основной приемной индуктивности.

Исследуемые растворы были приготовлены взвешиванием соли NaCl и дистиллированной воды. Растворы тщательно перемешивались и заливались в стандартные для техники ЯМР-спектроскопии 5-миллиметровые ампулы. Для контроля температуры был использован цифровой сенсор DS18B20, калибровка которого была перепроверена в лаборатории температурного контроля ВНИИМ(а) им. Д.И. Менделеева. Температурный сенсор размещался в корпусе датчика ЯМР сигналов на расстоянии 0.5 мм под ампулой, содержащей исследуемый раствор. Использовалось вращение ампулы для обеспечения высокой однородности магнитного поля. При этом вращение ампулы создавало локальный воздушный вихрь, который минимизировал разность температур между раствором образца и корпусом температурного сенсора.

В спектрометре была использована интегральная схема AD9958 для формирования двух опорных частот, близких к резонансным частотам исследуемой пары

ядер:

$$f_{op} = 90\,971\,949.827 \text{ Hz}; \quad f_{oNa} = 24\,063\,356.649 \text{ Hz}. \quad (2)$$

Магнитное поле спектрометра было равно  $B \approx 2.136\,682$  Т, при котором регистрируемые после усиления и преобразования резонансные частоты ядер  $\Delta f_p$  и  $\Delta f(^{23}Na^+)$  превышали опорные частоты (2) на несколько сотен герц.

При накоплении парного числового массива, содержащего частоты  $\Delta f_p$  и  $\Delta f(^{23}Na^+)$ , выполнялось последовательное суммирование сигналов свободной прецессии от двух ядер. Интенсивность каждого сигнала контролировалась оператором на мониторе. При достижении приемлемого отношения сигнал/шум  $> 5/1$  регистрировалось показание цифрового температурного сенсора. Числовой массив запоминался и пересылался для математической обработки. В наименовании каждого спектрального массива включали как температуру образца, так и концентрацию соли NaCl в образце.

## 2. Способ обработки числовых массивов

Ядро  $^{23}Na$  имеет сравнительно большой квадрупольный момент ( $Q = 0.1045 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$ , [10]), из-за которого ширина спектрального ЯМР сигнала натрия оказывается в  $\sim 5$  раз шире сигнала от протонов воды. Сигнал свободной прецессии от ядер  $^{23}Na^+$  затухает в пять раз быстрее, чем от протонов, и при оцифровке сигналов было достаточно регистрировать 5000 точек: по 2500 точек для действительной и мнимой составляющих сигнала.

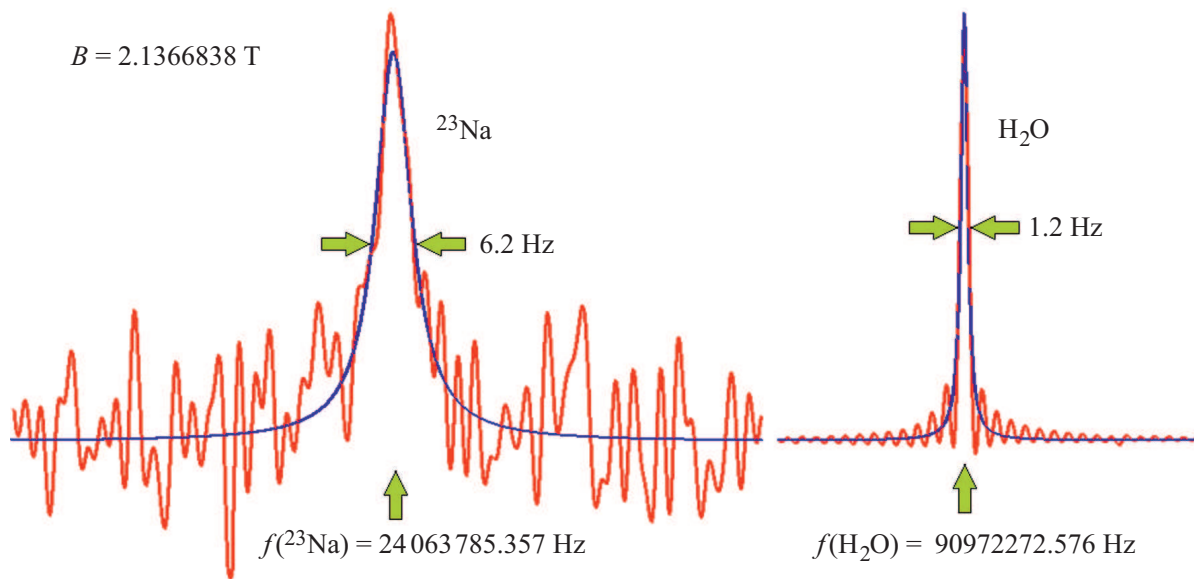
Как правило, числовой массив содержит сумму как четной, так и нечетной составляющей, и для прецизионного определения положения сигнала на частотной шкале требовалась математическая обработка. Для увеличения числа точек на интервале узкого спектрального сигнала (рис. 1) исходные числовые массивы расширялись нулями от 2501 до 32768 точек перед фурье преобразованием.

Ниже представлены аналитические выражения, которые были использованы для составления программного обеспечения и для оптимального описания сигналов спектра. Расчеты показывают, что с разумной степенью точности в качестве аналитического выражения для описания сигнала достаточно было использовать формулу Лоренца (рис. 1):

$$FRe(f_i) = \sum A_{ok} / \{1 + [(f_{ok} - f_i) / \Delta_{fk}]^2\}, \quad (3)$$

$$FIm(f_i) = \sum A_{ok} [(f_{ok} - f_i) / \Delta_{fk}] / \{1 + [(f_{ok} - f_i) / \Delta_{fk}]^2\}, \quad (4)$$

где  $A_{ok}$  — амплитуда сигнала,  $f_{ok}$  — положение сигнала на частотной шкале,  $2 \cdot \Delta_{fk}$  — ширина спектрального сигнала на половине высоты для протонов и ядер  $^{23}Na$  соответственно.



**Рис. 1.** Типичный парный спектр, полученный от ампулы с раствором NaCl в воде при одновременном накоплении двух сигналов от ядер  $^{23}\text{Na}$  и от протонов воды. Кривая с шумовым фоном соответствует экспериментальному числовому массиву, кривая без шумового фона соответствует контуру Лоренца.

Выражение (5) представляет функционал, который был использован в итерационной процедуре минимизации квадратичных отклонений данных числовых массивов от лоренцевой кривой при поиске оптимальных параметров  $A_{ok}$ ,  $\Delta f_k$  и  $f_{ok}$ .

$$(1/N) \sum [A\text{Re}(f_i) - F\text{Re}(f_i)]^2 + (1/N) \sum [A\text{Im}(f_i) - F\text{Im}(f_i)]^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $A\text{Re}(f_i)$  и  $A\text{Im}(f_i)$  часть числового вектора, полученного после преобразования Фурье, которая включала сигналы от протонов воды или ядер  $^{23}\text{Na}^+$ . В итерационную процедуру был включен также четвертый вариационный параметр  $c_k$ , который позволяет реализовать оптимальное разделение сигналов на четную и нечетную составляющие.

$$[A\text{Re}(f_i)]_{new} = [A\text{Re}(f_i)]_{old} \cdot \cos(2\pi c_k) + [A\text{Im}(f_i)]_{old} \cdot \sin(2\pi c_k), \quad (6)$$

$$[A\text{Im}(f_i)]_{new} = [A\text{Im}(f_i)]_{old} \cdot \cos(2\pi c_k) - [A\text{Re}(f_i)]_{old} \cdot \sin(2\pi c_k). \quad (7)$$

Суммирование (3)–(7) выполнялось на интервале частот 320 Hz, что соответствовало  $N = 1900$  точкам спектрального числового массива. В выражениях (3)–(7)  $i$ -ому индексу соответствовало значение от 1 до 1900. Программа обработки числового массива обеспечивала вариационный подбор четырех параметров с циклическим обращением к функционалу (5). При этом

**Таблица 1.** Изменение отношения частот резонанса протонов воды и ядер ионов натрия в зависимости от концентрации NaCl в водном растворе при  $t = 25.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$

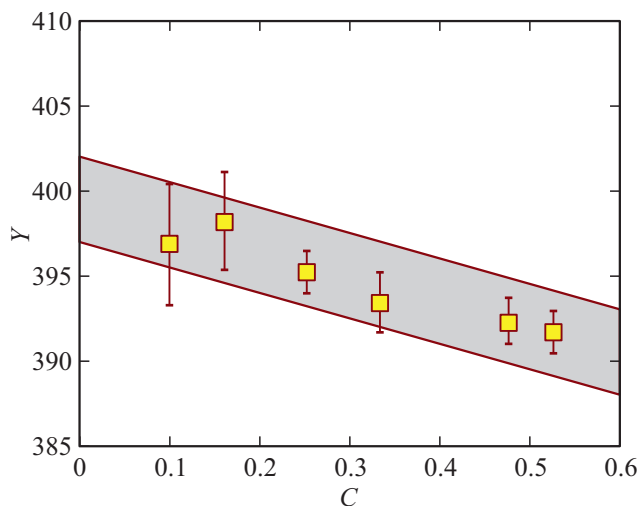
C, g(NaCl)/100g(H <sub>2</sub> O)	$N_s$	$f(\text{H}_2\text{O})/f(^{23}\text{Na}^+)$
0.53	15	3.780 463 920(7)
0.47	10	3.780 463 925(13)
0.33	10	3.780 463 935(19)
0.25	13	3.780 463 947(10)
0.17	10	3.780 463 980(27)
0.10	18	3.780 463 965(36)
0.00	–	3.780 463 993(25)

параметр  $c_k$  приближался к нулю с разделением составляющих комплексного представления спектра на четную и нечетную составляющие, что соответственно обеспечивало определение  $f_{ok}$ .

Экранирование протонов с минимальной погрешностью было определено в работе [8]:  $\sigma(\text{H}_2\text{O}) = 25680(2.5) \cdot 10^{-9}$  для  $25.0^\circ\text{C}$ , где в качестве сигнала сравнения использовался результат теоретического вычисления [11]:  $\sigma(\text{H}_2) = 26288(2) \cdot 10^{-9}$ .

Протоны воды в подавляющем большинстве участвуют в водородных связях. Число водородных связей уменьшается с повышением температуры, что является причиной соответствующего уменьшения частоты резонанса протонов. Экранирование протонов воды увеличивается, если они не участвуют в водородной связи.

Коэффициент температурной зависимости для экранирования протонов воды был определен в ряде работ, и в частности в [12]:  $\Delta\sigma(\text{H}_2\text{O})/\Delta t = 10.07(31) \cdot 10^{-9}/(1^\circ\text{C})$ .



**Рис. 2.** Зависимость отношения частоты резонанса протонов воды и частоты резонанса ядер  $^{23}\text{Na}^+$  в зависимости от концентрации NaCl в водном растворе. По горизонтали:  $C$  — концентрация NaCl в граммах на 100 g воды. По вертикали:  $Y = [f(\text{H}_2\text{O})/f(^{23}\text{Na}^+) - 3.780463] \cdot 10^9$ .

Соответственно для температурной коррекции частоты протонов необходимо использовать следующее выражение:

$$f(\text{H}_2\text{O}) = (f_{op} + \Delta f_p) \cdot \{1 + (t^\circ\text{C} - 25.0) \cdot [\Delta\sigma(\text{H}_2\text{O})/\Delta t]\}. \quad (8)$$

Для частот ядер натрия  $f(^{23}\text{Na}^+)$  температурная коррекция не требовалась, так как положительно заряженные ионы атомов натрия окружены атомами кислорода молекул воды, и электронное облако атомов кислорода у ионов  $^{23}\text{Na}^+$  поляризовано отрицательно. В этой связи для температурных коэффициентов имеет место следующее неравенство:

$$\Delta\sigma(\text{H}_2\text{O})/\Delta t \gg \Delta\sigma(^{23}\text{Na}^+)/\Delta t.$$

Наличие соли в воде меняет ее структуру и частоту резонанса протонов. Следовательно, требовалось определить отношение  $f(\text{H}_2\text{O})/f(^{23}\text{Na}^+)$  при экстраполяции раствора к нулевой концентрации NaCl.

В табл. 1 представлены данные для отношения частот резонанса протонов воды и ядер  $^{23}\text{Na}^+$  в зависимости от концентрации раствора и с учетом температурной коррекции (8), где так же указано  $N_s$  — число парных спектров, которые были обработаны по указанной выше методике и были использованы для определения средних величин и вычисления погрешности. На рис. 2 видно, что в исследованном интервале низких концентраций от 0.1 до 0.53 g на 100 g воды результаты для  $f(\text{H}_2\text{O})/f(^{23}\text{Na}^+)$  показывают линейную зависимость от содержания соли. Аналогичный наклон был определен и представлен в работе [13] для отношения  $f(^{23}\text{Na}^+)/f(\text{D}_2\text{O})$  при более

широком изменении диапазона концентраций соли NaCl в тяжелой воде.

Зависимость, представленная на рис. 2, позволяет определить результат экстраполяции к нулевой концентрации:

$$[f(\text{H}_2\text{O})/f(^{23}\text{Na}^+)]_o = 3.780463993(25). \quad (9)$$

Эту величину следует относить к единичным ионам  $^{23}\text{Na}^+$  в воде. Соответственно выражения (1) и (9) можно применить для определения  $\mu(^{23}\text{Na})$ , используя фундаментальные физические постоянные для чистой воды [1,7,8].

### 3. Обсуждение результатов определения $\mu(^{23}\text{Na})$

В табл. 2 представлены погрешности, которые необходимо учесть при вычислении магнитного момента ядра  $^{23}\text{Na}$ .

Наибольшая погрешность связана с неопределенностью вычисления экранирования ионов натрия  $\sigma(^{23}\text{Na}^+) = 5817(25) \cdot 10^{-7}$ . Этот результат представлен в работе [6], однако работы по более точному вычислению  $\sigma(^{23}\text{Na}^+)$  активно продолжаются в ряде научных групп, причем как в направлении оценки более точного описания динамичных сольватных слоев иона методом молекулярной динамики, так и соответствующего вычисления экранирования ядра иона на основе подхода Хартри–Фока и теории функционала суммарной электронной плотности. В этой связи, поскольку погрешности (табл. 2) отличаются более чем на два порядка, итоговый результат настоящей работы представлен как с корректировкой на экранирование ионов  $\sigma(^{23}\text{Na}^+)$ , так и без учета этой корректировки (табл. 3) для удобства последующего использования.

Можно отметить, что имеется некоторое расхождение данных для  $\mu(^{23}\text{Na})$  настоящей работы и данных работы [13] (табл. 3). Это расхождение проявляется еще больше, если исключить общую для обеих работ большую погрешность для  $\sigma(^{23}\text{Na}^+)$ . Вероятно, это расхождение связано не только с тем, что в настоящей работе была обеспечена температурная коррекция результатов (8). В работе [13] в качестве опорного сигнала был использован сигнал от ядер гелия-3. В таком случае таблица суммирования погрешностей (аналогичная табл. 2) должна содержать ряд дополнительных значимых составляющих и, в частности, составляющие влияния на магнитное поле перестройки частоты резонанса приемного контура при переходе на частоту ядер гелия-3. В настоящей работе данные для отношения  $f(\text{H}_2\text{O})/f(^{23}\text{Na}^+)$  были получены без смены образцов, без перестройки частот регистрации, а для прецизионной оценки магнитного поля были использованы сигналы от протонов воды, что рекомендовано международным комитетом по фундаментальным физическим константам [1].

**Таблица 2.** Суммирование погрешностей при определении  $\mu(^{23}\text{Na}^+)$

Физический параметр и влияние температуры	Вклад в погрешность	Ссылка, год
$\mu_p = 2.792\,847\,348(7)\mu_N$	$2.5 \cdot 10^{-9}$	[1,7], 2014
$\sigma(\text{H}_2\text{O}) = 25680(2.5) \cdot 10^{-9}$	$2.5 \cdot 10^{-9}$	[1,8], 2014
$f(\text{H}_2\text{O})/f(^{23}\text{Na}^+) = 3.780\,463\,993(25)$	$6.6 \cdot 10^{-9}$	Настоящая работа
Погрешность температуры $\pm 0.2^\circ\text{C}$	$2.0 \cdot 10^{-9}$	Настоящая работа
Суммирование 4-х погрешностей	$7.7 \cdot 10^{-9}$	–
$\sigma(^{23}\text{Na}^+) = 5817(25) \cdot 10^{-7}$	$2.5 \cdot 10^{-6}$	[6], CERN, 2019
Суммирование 5-и погрешностей	$2.5 \cdot 10^{-6}$	–

**Таблица 3.** Сравнение прецизионных данных для  $\mu(^{23}\text{Na})$

Магнитный момент, метод определения	Величина и погрешность	Относительная погрешность	Ссылка, год
$\mu(^{23}\text{Na})$ , ЯМР	2.2174997(111)	$\delta = 5.0 \cdot 10^{-6}$	[13], W. Makulski, 2019
$\mu(^{23}\text{Na})$ , ЯМР	2.217499(7)	$\delta = 3.0 \cdot 10^{-6}$	[6], R. Hardin et al., CERN, 2019
$\mu(^{23}\text{Na})$ , АЛМР	2.217495(2.2)	$\delta = 1.0 \cdot 10^{-6}$	[6], R. Hardin et al., CERN, 2019
$\mu(^{23}\text{Na})$ , ЯМР	2.2175065(55)	$\delta = 2.5 \cdot 10^{-6}$	Настоящая работа
$\mu(^{23}\text{Na}) \cdot [1 - \sigma(^{23}\text{Na}^+)]$	2.216216554(17)	$\delta = 7.7 \cdot 10^{-9}$	Настоящая работа

Ядерный магнитный момент ядра натрия  $\mu(^{23}\text{Na})$  был также определен методом атомно-лучевого магнитного резонанса (АЛМР) с погрешностью  $\delta = 1.0 \cdot 10^{-6}$  [14] без поправок на экранирование ядра  $^{23}\text{Na}$ . В работе [6] поправки для результата [14] были внесены и результат метода АЛМР представлен в табл. 3 для сравнения. Причем данные метода АЛМР для  $\mu(^{23}\text{Na})$  оказываются ниже на  $5 \cdot 10^{-6}$ , чем данные метода ЯМР настоящей работы (табл. 3). Но следует отметить, что техника ЯМР регистрирует спектральные сигналы с шириной (рис. 1), которая на порядок или несколько порядков меньше, чем ширина сигнала метода АЛМР и, вероятно, результат метода АЛМР может иметь систематическую погрешность на уровне пяти единиц шестого знака.

Данные о  $\mu(^{23}\text{Na})$  имеют особую значимость не только как основа для вычисления магнитных моментов нестабильных изотопов  $\mu(^{26-31}\text{Na})$  [6]. Прецизионная оценка  $\mu(^{23}\text{Na})$  позволяет более однозначно обеспечить шкалу химических сдвигов при локальных спектральных исследований на ядрах  $^{23}\text{Na}$  в тканях живого организма с использованием МР-томографов. Потребность в таких исследованиях несомненно велика [15]: химический сдвиг, концентрация, релаксационные свойства внутриклеточного и внеклеточного ядра  $^{23}\text{Na}$  дают ценную информацию о норме и патологии тканей живого организма.

### Благодарности

Автор выражает благодарность Серегину Н.Н. за помощь в разработке и изготовлении электронных модулей, использованных в настоящей работе.

### Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] P.J. Mohr, D.B. Newell, B.N. Taylor. Rev. Mod. Phys., **88** (3), (2016).
- [2] S.G. Karshenboim, V.G. Ivanov, Yu.I. Neronov, et al. Canad. J. Phys., **83** (4), 405 (2005).
- [3] Yu.I. Neronov, V.S. Aleksandrov. JETP Lett., **94** (6), 418 (2011).
- [4] A.A. Anselm, Yu.I. Neronov. Sov. Phys. JETP, **61** (6), 1946 (1985).
- [5] Yu.I. Neronov, N.N. Seregin. JETP, **115** (5), 777 (2012).
- [6] R.D. Harding et al. *Magnetic moments of short-lived nuclei with part-per-million precision, Paving the way for applications of  $\mu$ -detected NMR in chemistry and biology* (CERN, Wednesday 9th October, 2019)
- [7] A. Mooser, S. Ulmer, K. Blaum, K. Franke, H. Kracke, C. Leuteritz, W. Quint, C.C. Rodegheri, C. Smorra, A. Walz. Nature, **509**, 596 (2014).
- [8] Yu.I. Neronov, N.N. Seregin. Metrologia, **51** (1), 54 (2014).

- [9] V.S. Aleksandrov, Yu.I. Neronov. JETP Lett., **93** (6), 305 (2011).
- [10] N.J. Stone. Atom. Data Nucl. Data Tabl., **90**, 75 (2005).
- [11] D. Sundholm, J. Gauss, A. Schafer. J. Chem. Phys., **105**, 11051-9 (1996).
- [12] Yu.I. Neronov. Measurement Techniques, **60** (1), 96 (2017).
- [13] W. Makulski. Magnetochemistry, **5**, 68 (2019).  
DOI: 10.3390/magnetochemistry5040068.  
[www.mdpi.com/journal/magnetochemistry](http://www.mdpi.com/journal/magnetochemistry)
- [14] A. Beckmann, K. Boklen, D. Elke. Zeitschrift für Physik, **270**, 173 (1974).
- [15] Ю.И. Неронов. *Магнитный резонанс в томографии и в спектральных исследованиях тканей живого организма* (Изд-во СПб гос. ИТМО, СПб., 2007) 124 с.