

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

### РАБОТЫ ПО АТОМНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В СССР\*)

*С. Э. Фриш*

Дать в кратком обзоре сколько-нибудь исчерпывающее изложение работ по атомной спектроскопии, выполненных в СССР за последние годы, не представляется возможным. Поэтому мы остановимся только на некоторых работах, относящихся к наиболее характерным направлениям. В качестве таких направлений могут быть указаны следующие: изучение элементарных процессов возбуждения и испускания спектральных линий; определение методами оптической спектроскопии ядерных моментов;

---

\*) По материалам доклада автора на заседании Международной объединенной комиссии по спектроскопии совместно с Комиссией по спектроскопии АН СССР (Москва, 13 августа 1958 г.)

определение процессов в газах и парах при их свечении; использование длин световых волн для метрологических целей; приложения атомной спектроскопии к аналитическим задачам.

Из элементарных процессов, определяющих испускание спектральных линий, в первую очередь изучались вероятности переходов, которые, как известно, связаны с силами осцилляторов  $f$ . Последние наиболее точно могут быть определены интерферометрическим «методом крюков», разработанным еще в 1912 г. профессором тогдашнего Петербургского университета Д. С. Рождественским<sup>1</sup>. В этом методе простое измерение расстояния между «крюками» на спектрограмме позволяет найти значение произведения из концентрации поглощающих атомов на силу осциллятора  $Nf$ .

Д. С. Рождественский в своих первых работах использовал «метод крюков» для определения сил осцилляторов для дублетов щелочных металлов. В дальнейшем он создал экспериментальную установку, в которой с помощью высокотемпературной электрической вакуумной печи, типа печи Кинга, можно было наблюдать «крюки» в спектрах паров тугоплавких элементов<sup>2</sup>. С помощью этой установки Н. П. Пенкиным, Ю. И. Островским и др. выполнено большое число измерений абсолютных и относительных сил осцилляторов для линий многих элементов (Cr, Ni, Fe, Co, V, Ti, Mn и др.<sup>3</sup>). Относительные значения сил осцилляторов по наблюдаемому аномальной дисперсии в разряде электрической дуги постоянного тока определялись в последнее время Е. И. Никоновой и В. К. Прокофьевым для мультиплетов нейтральных атомов Al, Tl, Mn, Mo и для ионов Ba, Ca, Sr<sup>4</sup>.

Г. П. Старцевым создан и опробован новый вариант «метода крюков», основанный на использовании трехлучевого интерферометра<sup>5</sup>. Ю. И. Островским, Н. П. Пенкиным и Л. Н. Шабановой предложено для определения абсолютных сил осцилляторов комбинировать измерение аномальной дисперсии с измерением эквивалентной ширины линий<sup>6</sup>. А. Л. Ошеровичем выполнена работа по определению абсолютного значения времени затухания для гелия метода запаздывающих совпадений<sup>7</sup>.

Результаты измерений, выполненных методом аномальной дисперсии для щелочных металлов и некоторых других элементов, находятся в хорошем согласии с квантовомеханическими расчетами, проведенными В. А. Фоком и его сотрудниками. Позже М. И. Петрашень и И. В. Абаренков дали упрощенный полужемпирический метод расчета вероятностей переходов<sup>8</sup>. Существенно отметить, что результаты теоретических расчетов хорошо совпадают с экспериментальными данными лишь в случае учета всех видов взаимодействий внутри атома, включая обменные и поляризационные силы. Полуклассические методы расчета, как правило, не подтверждаются. Так, измерения выполненные, по «методу крюков» В. К. Прокофьевым в натрии и Г. С. Кватером в таллии, не подтвердили правила сумм Томаса—Куна<sup>9</sup>. В. А. Фок теоретически показал, что такое расхождение между опытными данными и правилом сумм вызвано взаимодействием между электронами, входящими в состав электронной оболочки атома<sup>10</sup>. В последнее время Л. А. Вайнштейн вычислил силы осцилляторов для ряда атомов в одноэлектронном приближении с использованием электронно-счетных машин<sup>11</sup>.

Второй из элементарных атомных констант, определяющей возбуждение спектральных линий, которая измерялась в ряде работ, является эффективное сечение атомов по отношению к возбуждающим столкновениям с электронами. Как известно, считалось, что вид функции возбужде-

ния энергетического уровня атома непосредственно определяется видом оптической функции возбуждения спектральной линии, для которой данный уровень является исходным. Измерения интенсивностей линий ртути возбуждаемых электронным ударом которые были произведены с помощью фотоумножителя И. П. Запесочным и С. Э. Фришем<sup>12</sup>, показали, что это неверно. Функции возбуждения большинства линий ртути имеют по несколько тесно расположенных максимумов, которые оставались в прежних работах незамеченными. Эти вторичные максимумы в большинстве обусловлены каскадными переходами. Истинные функции возбуждения большей части энергетических уровней ртути имеют по одному острому максимуму, расположенному вблизи потенциала возбуждений. В некоторых случаях наблюдается второй размытый максимум, лежащий при более высоких потенциалах. Наличие вторых максимумов наблюдается также на функциях возбуждения гелия<sup>13</sup>. Результаты, полученные для ртути, позже были подтверждены измерениями голландских физиков Смита и Ионгернуса<sup>14</sup>.

Г. Г. Долговым произведено экспериментальное изучение поляризации линий атомов гелия, неона и аргона при возбуждении электронами вблизи порога возбуждения<sup>15</sup>.

Г. Ф. Друкаревым составлено интегро-дифференциальное уравнение, позволяющее вычислить эффективное сечение атомов по отношению к соударениям с медленными электронами с учетом обменных сил<sup>16</sup>. Оказалось, что роль обменных сил настолько значительна, что все ранее выполненные расчеты для столкновений с медленными электронами без учета обменных сил являются слишком грубыми. По методу Друкарева В. И. Очкурром вычислены на электронно-счетной машине эффективные сечения  $S$ - и  $P$ -состояний водорода. В случае  $S$ -состояний показано наличие у функции возбуждения второго размытого максимума<sup>17</sup>. Г. Г. Долгов и Л. А. Вайнштейн провели расчет также с помощью электронно-счетной машины эффективных сечений возбуждения ряда состояний атома гелия в приближении сильной связи. Показаны большие значения парциальных сечений вблизи порога для соударений с электронами при  $l > 0$ <sup>18</sup>.

Необходимо отметить теоретические работы по расчету энергии стационарных состояний атомов. В. А. Фок дал способ учета обменных сил в атомах и разработал приближенный метод расчета энергии стационарных состояний, широко известный под названием метода Фока—Хартри<sup>19</sup>. Методы, разработанные В. А. Фоком, были развиты и применены группой его сотрудников (М. Г. Веселов, М. И. Петрашень и др.) к расчету свойств атомов щелочных и щелочно-земельных элементов и к вычислению вероятностей переходов в атомах<sup>20</sup>. В настоящее время приближенные методы расчета свойств атомов широко применяются в ряде научных центров СССР, в том числе в Академии наук Литовской ССР, где под руководством А. П. Юциса ведутся расчеты энергетических уровней большого числа различных атомов<sup>21</sup>.

В ряде расчетов применены электронно-счетные машины. Например, Ю. Н. Демковым и его сотрудниками на электронно-счетной машине выполнен точный расчет верхней и нижней границ для энергии основного состояния атома гелия в нерелятивистском приближении<sup>22</sup>.

Особым разделом изучения атомных констант является изучение ядерных моментов методами оптической спектроскопии. Еще в 1928 г. А. Н. Теренин и Л. Н. Добрецов одновременно с Шюлером в Германии и независимо от него обнаружили сверхтонкую структуру на  $D$ -линиях

натрия. Несколько позже Е. Ф. Гросс и А. Н. Филиппов наблюдали аналогичную структуру на линиях цезия<sup>23</sup>. Затем определению спиновых и квадрупольных моментов ядер методами оптической спектроскопии был посвящен ряд работ советских физиков. Ф. М. Герасимовым и С. Э. Фришем было установлено, что наличие ядерного момента сказывается на явлении Зеемана даже в относительно сильных магнитных полях порядка 20 000 эрстед и больше<sup>24</sup>.

В последнее время работы были главным образом посвящены определению моментов наиболее тяжелых элементов и изотопическому сдвигу в их спектрах. Н. И. Калигеевским, М. П. Чайка, А. Р. Стригановым и др. были определены спиновые и квадрупольные моменты изотопов урана и плутония и изучен изотопический сдвиг их линий<sup>25</sup>. Сверхтонкая структура и изотопический сдвиг изучены также в спектрах Се, Рг, Но, Ду<sup>26</sup>. Исследовалась возможная роль октупольных моментов. Проведены работы по улучшению методов наблюдения сверхтонкой структуры; разработана методика автоматической регистрации сверхтонких компонент спектральных линий. Проведены работы по повышению светосилы и разрешающей силы интерференционных установок путем использования многослойных и диэлектрических покрытий<sup>27</sup>. Созданы источники с атомным пучком, обеспечивающие достаточно большую интенсивность линий при их малом расширении<sup>28</sup>.

Ю. П. Донцовым и А. Р. Стригановым исследована зеленая линия ртути, испускаемая источником, содержащим ртуть, получаемую при бомбардировке золота нейтронами. Наряду с линией изотопа ртути  $Hg^{198}$  обнаружена слабая линия, принадлежащая изотопу ртути  $Hg^{199}$ . По отношению интенсивностей этих линий и по величине потока нейтронов определено<sup>29</sup> сечение захвата тепловых нейтронов изотопом золота  $Hg^{198}$ .

---

Изучение процессов в газах и парах при их свечении в значительной мере проводилось «методом крюков» Рождественского. Этот метод, как сказано, позволяет измерять произведение  $Nf$ . Таким образом, если известно  $f$ , то может быть определена концентрация атомов  $N$  в светящемся газе. Г. С. Кватер, изучая аномальную дисперсию в парах таллия, непосредственно показал, что концентрация атомов на метастабильном уровне таллия в нагретых парах удовлетворяет закону Больцмана<sup>30</sup>. Позже С. Э. Фриш, Н. П. Пенкин и А. М. Шухтин подтвердили, что распределение атомов по уровням при температурном свечении тоже удовлетворяет закону Больцмана; наконец, методом же «крюков» было проверено, что концентрация ионов в газе, нагретом до высокой температуры, соответствует формуле Саха<sup>31</sup>.

Дальнейшее применение «метода крюков» позволило изучить газы в состоянии, далеко от термодинамического равновесия, когда статистические законы не выполняются. Впервые «метод крюков» Рождественского для определения концентрации возбужденных атомов в светящемся газе был использован немецким физиком Ладенбургом<sup>32</sup>, который по согласованию с Рождественским точно скопировал его интерферометрическую установку. Однако работы Ладенбурга проводились без параллельного определения электрических характеристик разряда, что снижало их ценность. Впоследствии, применяя параллельно измерение аномальной дисперсии «методом крюков» и электрических характеристик разряда методом зондов Ленгмюра, Н. П. Пенкин, Ю. М. Каган и др. смогли получить более надежные результаты. Были измерены концентрации возбужденных атомов в разряде в парах ртути, в инертных газах и в смесях паров ртути

с инертными газами<sup>33</sup>. Были наблюдаемы отступления от равновесных распределений и условия приближения к равновесным распределениям. Теоретически нарушения термодинамического равновесия, вызванного выходом излучения, и границы применимости закона Кирхгофа рассмотрены Л. М. Биберманом, С. Л. Мандельштамом и Н. К. Суходрев<sup>34</sup>.

Исследования газов при электрическом разряде (газоразрядной плазмы) проводились в СССР не только методами аномальной дисперсии, но и методами эмиссионной и абсорбционной спектроскопии. Первые работы в этой области принадлежат В. А. Фабриканту и группе его сотрудников<sup>35</sup>. Измеряя интенсивность линий испускания и одновременно величину реабсорбции, а также проводя зондовые измерения, Фабрикант показал, что при малых давлениях и малых плотностях тока наблюдаемая интенсивность резонансных линий хорошо согласуется с вычисленной по концентрации электронов и электронной температуре.

Роль переноса излучения в объемных источниках света была подробно изучена Л. М. Биберманом<sup>36</sup>, который разработал теорию диффузии резонансного излучения, учитывая эффект изменения частоты фотона в процессе его поглощения и последующего испускания. Эта работа была выполнена независимо и одновременно с аналогичными работами Хольстейна и Занстра<sup>37</sup>. Наряду с численным решением стационарного интегрального уравнения Биберман дал также упрощенный метод учета диффузии излучения, с помощью которого в частности, им рассмотрен практически важный случай свечения цилиндрического объема<sup>38</sup>. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными, относящимися к разряду в парах ртути низкого давления и в смеси паров ртути с аргоном<sup>39</sup>.

С. Э. Фришем и Ю. М. Каганом спектроскопическим методом исследовано движение положительных ионов в положительном столбе газового разряда<sup>40</sup>. По доплеровскому смещению ионных линий, наблюдаемому с помощью интерферометра Фабри—Перо, была измерена переносная скорость ионов, оказавшаяся одного порядка с их тепловыми скоростями. Одновременно была выяснена большая роль радиальных электрических полей в цилиндрической разрядной трубке. Было выяснено, что ширина спектральной линии иона больше при ее наблюдении поперек трубки, чем при наблюдении вдоль. Ю. М. Каганом и В. П. Перелем вопрос о движении ионов в положительном столбе разряда рассмотрен также теоретически<sup>41</sup>.

Ряд работ посвящен экспериментальному и теоретическому исследованию ширины спектральных линий. Н. Н. Соболевым и его сотрудниками изучен контур линий в дуге постоянного тока и выяснена роль ударного расширения<sup>42</sup>. И. И. Сوبельманом и Л. А. Вайнштейном рассмотрены границы ударной и статистической теории расширения линий<sup>43</sup>. Дана строгая теория ударного уширения, вызванного соударениями с электронами, и теория квадрупольного уширения. М. А. Мазинг и С. Л. Мандельштамом экспериментально изучено уширение спектральных линий в слабо и сильно ионизированной плазме и измерен одновременный сдвиг линий<sup>44</sup>. Выяснено, что в отличие от обычной стационарной теории, новая нестационарная теория уширения линий дает немонотонную зависимость ширины от температуры электронов. Другой новый результат нестационарной теории заключается в том, что отношение ширины линий к ее сдвигу оказывается зависящим от природы спектральных термов.

Влияние реабсорбции на контур спектральной линии изучено Л. М. Биберманом. Им указана возможность измерять по уширению линии, вызванному реабсорбцией, произведение  $Nf$ <sup>45</sup>.

С. Л. Мандельштамом с большой группой сотрудников проведена работа по изучению искрового разряда с точки зрения понимания

механизма возбуждения! линий многократно-ионизированных атомов<sup>46</sup>. Создана новая гидродинамическая теория искры. Канал искры рассматривается как взрыв, обусловленный быстрым выделением большого количества энергии. Образуется радиально расширяющаяся ударная волна, ионизирующая и увлекающая за собой газ. Для экспериментального изучения искры была создана установка, позволяющая получать интерферограммы канала искрового разряда. Интерферограммы дают возможность наблюдать ударную волну, оболочку канала и сам канал и измерять температуру в различных точках его сечения в различные моменты времени. Установлено, что в плазме канала искры успевает возникнуть равновесное распределение частиц, подчиняющееся законам Кирхгофа и Саха. Температура в канале искры достигает 40—50 000°.

Для изучения нестационарных процессов в плазме А. М. Шухтиным и В. С. Егоровым создана также установка, дающая возможность фотографировать «крюки» в методе Рождественского за промежуток времени порядка микросекунды<sup>47</sup>. Специальное электронное приспособление позволяет синхронизировать момент съемки с определенным моментом развития изучаемого нестационарного процесса.

В Советском Союзе проведены большие работы по сравнению длины нормального метра с длиной световой волны. Эти работы были начаты свыше тридцати лет назад по инициативе Д. С. Рождественского. Работы начались с изучения красной линии кадмия ( $\lambda$  6438 Å) с точки зрения ее пригодности в качестве первичной нормали и в случае необходимости ее замены другой линией.

М. Ф. Романова и А. А. Ферхмин, исследуя красную линию кадмия, возбуждаемую в полом катоде, обнаружили у нее наличие четырех компонент, три из которых приблизительно одной яркости и расположены на расстоянии 0,004 Å друг от друга; четвертая компонента, очень слабая, расположена на расстоянии 0,009 Å от трех первых<sup>48</sup>. Позже Н. Р. Батарчуковой был разработан интерференционный монохроматор, позволяющий выделять из зеленой линии естественной ртути одну сверхтонкую компоненту, а также были изучены одноизотопные источники света<sup>49</sup>.

Метод сравнения длины нормального метра с длиной волны красной линии кадмия был предложен в новом варианте А. А. Лебедевым и М. Ф. Романовой и выполнен в Научно-исследовательском институте метрологии группой сотрудников под руководством М. Ф. Романовой<sup>50</sup>. Использовался трубчатый эталон длиной 1005 мм, внутри которого располагалась концевая метровая мера. Длина трубчатого эталона интерферометрически сравнивалась с длиной малого трубчатого эталона, в девять раз более короткого. Длина этого малого эталона непосредственно интерферометрически определялась в длинах волн красной линии кадмия. Измерения производились при откаченных трубчатых эталонах и при наличии в них воздуха. Концевая метровая мера сравнивалась с платино-иридиевым эталоном метра № 28. Для длины волны красной линии естественно-го кадмия в воздухе получено

$$\lambda_{\text{н}} = 0,64384687 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Средняя квадратичная ошибка оценивается в 0,0004 Å.

Для чистого четного изотопа кадмия  $\text{Cd}^{114}$  получено

$$\lambda_{\text{н}} = 0,64384678 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

при средней квадратичной ошибке 0,0001 Å.

Рассмотрение работ спектрально-аналитического характера относится к компетенции другой Комиссии, однако я позволю себе кратко остановиться на работах по спектральному анализу, проводимых в СССР, так как у нас не принято их отделять от других спектральных исследований. В соответствии с этим в СССР велись работы не только по внедрению различных приемов спектрального анализа, но и по исследованию физических процессов, лежащих в основе спектрально-аналитических методов.

Систематические работы по физическому обоснованию методов эмиссионного спектрального анализа были начаты еще в 1936 г. под руководством Г. С. Ландсберга. Эти работы ставили своей целью изучение факторов, определяющих интенсивность спектральных линий в основных источниках света, употребляемых в спектральном анализе (в пламени, дуге и искре). С. Л. Мандельштамом и группой его сотрудников проведено экспериментальное и теоретическое исследование интенсивностей линий при термическом возбуждении при наличии электрического поля, обуславливающего дрейф ионов<sup>51</sup>. Было установлено, что интенсивность каждой линии проходит при изменении температуры через максимум. Это явление аналогично изменению интенсивности линий в спектре звезд, лежащему в основе звездной классификации. Изучена интенсивность линий и интерферометрически определена концентрация атомов в пламени. Исследована зависимость интенсивности линий от концентрации атомов и показана применимость используемой в астрофизике теории «кривых роста».

Механизм испарения вещества твердых электродов в пламя дуги был изучен В. К. Прокофьевым, С. Л. Мандельштамом и рядом других авторов<sup>52</sup>. Е. И. Никонова и В. К. Прокофьев исследовали методом аномальной дисперсии радиальное распределение атомов металлов в пламени дуги постоянного тока и нашли, что на оси дуги имеется минимум концентрации. Было также изучено свечение факела искры. Установлен взрывной характер процессов на электродах, ведущих к образованию факела, и высокая температура паров электродов в факеле до 30 000°<sup>53</sup>.

Из практических методов спектрального анализа необходимо указать разработанные еще в 30-х годах упрощенные визуальные методы полуколичественных анализов с помощью стипоскопов и стипометров. Благодаря своей простоте эти методы до сих пор используются в заводской практике. В настоящее время вводятся в практику фотоэлектрические приборы для проведения количественного спектрального анализа.

Из более специальных методов эмиссионного спектрального анализа укажем на метод испарения, разработанный одновременно в двух различных вариантах С. Л. Мандельштамом и А. Н. Зайделем с группами их сотрудников<sup>54</sup>. Этот метод предназначен для исследования тяжелых металлов на малые примеси более легкоплавких элементов. Он обеспечивает высокую чувствительность вплоть до  $10^{-5}$ %. Сущность метода заключается в том, что анализируемые примеси отделяются путем испарения от основного элемента пробы и затем подвергаются спектральному анализу.

Ряд работ был посвящен методам спектроскопического определения газов в металлах. О. Б. Фальковой и С. Л. Мандельштамом разработан метод определения азота и кислорода в металлах путем их возбуждения в искре в атмосфере инертного газа. Проблеме определения газов в металлах был посвящен также ряд работ Н. С. Свентицкого<sup>55</sup>. А. Н. Зайдель создал оригинальный метод спектрального анализа водорода в металлах, основанный на уравнивании растворенного в анализируемой пробе водорода с известным количеством дейтерия и на последующем спектральном анализе водородно-дейтериевой смеси<sup>56</sup>. Кроме того, А. Н. Зайделем

и его сотрудниками в последнее время разработаны методы количественного спектрального анализа элементов на изотопический состав<sup>57</sup>.

О. П. Бочковой, С. Э. Фришем и Е. Я. Шрейдер разработан метод спектрального анализа газовых смесей<sup>58</sup>. Газ возбуждается в кварцевом капилляре высокочастотным разрядом с внешними электродами. Соответственный подбор диаметра капилляра и давления газа позволяет получить достаточно высокую чувствительность как при анализе газа на трудно-возбудимые, так и на легковозбудимые компоненты. Создана упрощенная (без спектрографа) методика анализа аргона и других инертных газов на чистоту. Также разработана методика анализа микроколичеств газа.

Советской промышленностью выпускается вся необходимая для проведения спектрального анализа аппаратура, описание которой имеется в соответственных публикациях<sup>59</sup>. Группой сотрудников под руководством Ф. М. Герасимова, налажено изготовление плоских и вогнутых дифракционных решеток, предназначенных для работы во всем диапазоне длин волн от мягких рентгеновых лучей до далеких инфракрасных лучей с длиной волны 600—700  $\mu$ <sup>60</sup>. Путем соответственного наклона рабочих граней в максимуме концентрируется до 85% отраженного света.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Д. С. Рождественский, Журн. Русск. физ.-хим. об-ва, физ. отд. 42, 87 (1910); Труды ГОИ 2, № 13 (1921); Работы по аномальной дисперсии в парах металлов, Изд. АН СССР, М.—Л., 1951.
2. Д. С. Рождественский и Н. П. Пенкин, J. Phys. USSR 5, 319 (1941); Изв. АН СССР, сер. физ., № 5, 97 (1941).
3. Н. П. Пенкин, ЖЭТФ 17, 1114 (1947); Г. Ф. Парчевский и Н. П. Пенкин, Вестник ЛГУ, № 11, 113 (1954); Ю. И. Островский и Н. П. Пенкин, Опт. и спектр. 3, 193; 391 (1957); 5, 6 (1958); Ю. И. Островский, Опт. и спектр. 2, 673 (1957); Ю. И. Островский и Н. П. Пенкин, Опт. и спектр. 4, 719 (1958); Ю. И. Островский, Н. П. Пенкин и Л. Н. Шабанова, Изв. АН СССР, сер. физ. 22, 725 (1958); Л. В. Гурвич, Опт. и спектр. 5, 205 (1958).
4. Е. И. Никонова и В. К. Прокофьев, Опт. и спектр. 1, 290 (1956).
5. Г. П. Старцев, ДАН 95, 1181 (1954).
6. Ю. И. Островский, Н. П. Пенкин и Л. Н. Шабанова, ДАН 120, 66 (1958).
7. А. Л. Ошерович и Н. Г. Савич, Опт. и спектр. 4, 715 (1958).
8. М. И. Петрашень и В. А. Абаренков, Вестник ЛГУ, № 5, 141 (1954); Ф. Яноух, Вестник ЛГУ, № 2, 135 (1955).
9. Г. С. Кватер, ЖЭТФ 11, 421 (1941); Изв. АН СССР, сер. физ. 9, 236 (1945); Вестник ЛГУ, № 2, 135 (1947).
10. В. А. Фок, Zeits. f. Phys. 89, 744 (1934).
11. Л. А. Вайнштейн, Изв. АН СССР, сер. физ. 22, 671 (1958); Опт. и спектр. 3, 313 (1957).
12. С. Э. Фриш и И. П. Запесочный, ДАН 95, 971 (1954); Изв. АН СССР, сер. физ. 19, 5 (1955); И. П. Запесочный, Вестник ЛГУ, № 11, 67 (1954).
13. С. Э. Фриш и В. Е. Яхонтова, Опт. и спектр. 4, 402 (1958).
14. J. A. Smith and H. M. Jongerius, Appl. Sci. Res. 5, 59 (1955).
15. Г. Г. Долгов, Опт. и спектр. 4, 268 (1958).
16. Г. Ф. Друкарев, ЖЭТФ 25, 139 (1953); Вестник ЛГУ, № 8, 153 (1953).
17. В. И. Очкур, Вестник ЛГУ, № 4, 53 (1958).
18. Г. Г. Долгов, Опт. и спектр. 4, 268 (1958).
19. В. А. Фок, Труды ГОИ 5, № 51 (1931); ЖЭТФ 4, 5 (1934); В. А. Фок и М. И. Петрашень, ЖЭТФ 6, 1 (1936); 4, 295 (1934); Sow. Phys. 8, 547 (1935); В. А. Фок, ЖЭТФ 10, 961 (1940); В. А. Фок, М. Г. Веселов и М. И. Петрашень, ЖЭТФ 10, 723 (1940).
20. М. Г. Веселов, Вестник ЛГУ, № 8, 181 (1953); И. В. Абаренков, Вестник ЛГУ, № 10, 43 (1956); М. Г. Веселов и И. Б. Берсукер, Вестник ЛГУ, № 16, 55 (1957); Изв. АН СССР, сер. физ. 22, 662 (1958).
21. А. П. Юцис, ЖЭТФ, 19, 565 (1949); 23, 129 (1952); Г. К. Цюнайтис, В. В. Кибартас и А. П. Юцис, Опт. и спектр. 1, 5 (1956); Я. И. Визбарайте, В. И. Широкас, В. В. Кавецкис и А. П. Юцис, Опт. и спектр. 1, 277 (1956); А. П. Юцис, К. К. Ушпалис, В. И. Кавецкис и И. Б. Левинсон, Опт. и спектр. 1, 601 (1956); А. П. Юцис,



- Я. Н. Визбарайте, В. И. Кавецкис и П. В. Батарунас, Изв. АН СССР, сер. физ. 22, 665 (1958).
22. Ю. Н. Демков, М. Г. Нейгауз и В. В. Сенюков, Опт. и спектр. 4, 709 (1958).
  23. Л. Н. Добрецов и А. Н. Теренин, Naturwiss. 16, 656 (1928); А. Н. Филиппов и Е. Ф. Гросс, Naturwiss. 17, 121 (1929).
  24. С. Э. Фриш и Ф. М. Герасимов, ЖЭТФ 8, 267 (1938).
  25. А. Р. Стриганов и Л. А. Коростылева, ЖЭТФ 29, 393 (1955); Н. И. Калитеевский и М. П. Чайка, ДАН 103, 49 (1955); Вестник ЛГУ, № 11, 121 (1955); Опт. и спектр. 1, 606; 809 (1956); Н. М. Яшин, Опт. и спектр. 2, 409 (1957); Н. Г. Морозова и Г. П. Старцев, Изв. АН СССР, сер. физ. 22, 686 (1958).
  26. Л. А. Коростылева, А. Р. Стриганов и Н. М. Яшин, ЖЭТФ 28, 471 (1955); Ю. П. Донцов, Опт. и спектр. 1, 612 (1956); Л. А. Коростылева, Опт. и спектр. 3, 536 (1957); В. Б. Белянин, Опт. и спектр. 3, 322 (1957); 4, 264 (1958); Ю. П. Донцов и Л. А. Коростылева, Изв. АН СССР, сер. физ. 22, 683 (1958).
  27. А. Л. Ошерович и А. Г. Жиглинский, Вестник ЛГУ, № 4, 3 (1956); Н. И. Калитеевский и М. П. Чайка, Вестник ЛГУ, № 4, 9 (1956); Ф. А. Королев, Вестник МГУ, № 3, 101; 105 (1953); ДАН 88, 965 (1953); Ф. А. Королев и В. И. Одицов, Опт. и спектр. 1, 17 (1956); К. И. Тарасов, Опт. и спектр. 1, 103 (1956); М. П. Чайка, Опт. и спектр. 3, 372 (1957).
  28. В. А. Громов, Опт. и спектр. 2, 669 (1956).
  29. Ю. П. Донцов и А. Р. Стриганов, Опт. и спектр. 2, 21 (1957).
  30. Г. С. Кватер, ЖЭТФ 11, 421 (1941).
  31. С. Э. Фриш, Н. П. Пенкин и А. М. Шухтин, ЖЭТФ 18, 734 (1948); Н. П. Пенкин, Изв. АН СССР, сер. физ. 11, 217 (1947).
  32. R. Ladenburg, Rev. Mod. Phys. 5, 243 (1933).
  33. Ю. М. Каган и Н. П. Пенкин, Изв. АН СССР, сер. физ. 14, 721 (1950); ЖЭТФ 21, 1182 (1951); Н. П. Пенкин и М. Н. Палладин, Изв. АН СССР, сер. физ. 19, 16 (1955); Вестник ЛГУ, № 8, 113 (1955).
  34. С. Л. Мандельштам и Н. К. Суходрев, Изв. АН СССР, сер. физ. 19, 11 (1955); Л. М. Биберман, ЖЭТФ 19, 584 (1949).
  35. В. А. Фабрикацт, Изв. АН СССР, сер. физ. 3, 441 (1936); ДАН 15, 451 (1937); 22, 574 (1939); ЖЭТФ 8, 549 (1938); Труды ВЭИ, вып. 41 (1940); ЖЭТФ 17, 1037 (1947); К. Паневкин, ЖЭТФ 9, 1007 (1939); Ф. А. Бутаева и В. А. Фабрикант, Изв. АН СССР, сер. физ. 9, 230 (1945); ЖЭТФ 18, 1127 (1947); В. П. Титушина и В. А. Фабрикант, Опт. и спектр. 5, 3 (1958).
  36. Л. М. Биберман, ЖЭТФ 17, 416 (1947); ДАН 49, 659 (1948); Л. М. Биберман и И. И. Гуревич, ЖЭТФ 19, 507 (1949); Л. М. Биберман и Б. А. Векленко, ЖЭТФ 31, 341 (1956).
  37. T. Holstein, Phys. Rev. 72, 1212 (1947); H. Zanstra, Bull. Astr. Inst. Nath. 11, № 401 (1949).
  38. Л. М. Биберман и Б. А. Векленко, Материалы X совещания по спектроскопии, Львов (1958).
  39. И. И. Гуревич и Д. Шкловер, Журн. техн. физ. 17, 61 (1947).
  40. С. Э. Фриш и Ю. М. Каган, ЖЭТФ 12, 342 (1942); 17, 577 (1947); 18, 519 (1948); Изв. АН СССР, сер. физ. 12, 358 (1948); В. М. Захарова, Опт. и спектр. 1, 636 (1956).
  41. Ю. М. Каган и В. И. Перель, ДАН 98, 575 (1954); Опт. и спектр. 2, 298 (1957); 4, 3 (1958); 4, 285 (1958); Ю. М. Каган, Изв. АН СССР, сер. физ. 22, 702 (1958).
  42. В. Ф. Китаева и Н. Н. Соболев, Опт. и спектр. 1, 302 (1956).
  43. И. И. Собоelman, Усп. физ. наук 54, 907 (1954); Опт. и спектр. 1, 617 (1956); Труды физ. ин-та АН СССР 9, 313 (1958); В. И. Коган, ДАН 118, 907 (1958); Изв. АН СССР, сер. физ. 22, 714 (1958).
  44. М. А. Мазинг и С. Л. Мандельштам, Опт. и спектр. 2, 276 (1957); Л. А. Вайнштейн, В. Г. Колошиков, М. А. Мазинг, С. Л. Мандельштам и И. И. Собоelman, Изв. АН СССР, сер. физ. 22, 718 (1958).
  45. Л. М. Биберман и Е. М. Новодворская, ДАН 106, 35 (1956); Л. М. Биберман, Опт. и спектр. 3, 397 (1957); П. М. Нагибина, Опт. и спектр. 4, 430 (1958); Изв. АН СССР, сер. физ. 22, 681 (1958).
  46. Л. А. Вайнштейн, М. А. Леонтович, Л. П. Малявкин и С. Л. Мандельштам, ЖЭТФ 24, 326 (1953); С. Л. Мандельштам и Н. К. Суходрев, ЖЭТФ 24, 701 (1953); С. Л. Мандельштам и И. И. Тидло, Изв. АН СССР, сер. физ. 19, 60 (1955).
  47. А. М. Шухтин и В. С. Егоров, Опт. и спектр. 2, 543 (1957); Изв. АН СССР, сер. физ. 22, 711 (1958).

48. М. Ф. Романова и А. А. Ферхмин, ДАН № 2, 55 (1933).
49. Н. Р. Батарчукова, ДАН 58, 1013 (1947); Труды ВНИИМ 7, 47 (1949); Опт. и спектр. 4, 112 (1958); Изв. АН СССР, сер. физ. 22, 708 (1958); Н. Р. Батарчукова и А. Н. Карташев, Изв. АН СССР, сер. физ. 14, 753 (1951); Н. Р. Батарчукова, А. И. Карташев и М. Ф. Романова, ДАН 90, 53 (1953); Н. Р. Батарчукова и Г. Б. Дубровский, Опт. и спектр. 1, 330 (1956).
50. А. А. Лебедев, Сборник работ по ед. мер., стр. 67 (1938); М. Ф. Романова и Н. М. Гудрис, Сборник работ по ед. мер., стр. 77 (1938); М. Ф. Романова, Г. В. Варлих, А. И. Карташев и Н. Р. Батарчукова, ДАН 37, 54 (1942); М. Ф. Романова и А. И. Карташев, Труды ВНИИМ 7, 23 (1949); М. Ф. Романова, Е. А. Волкова и Л. А. Каяк, Труды ВНИИМ 16, 4 (1951); Е. А. Волкова, А. И. Карташев, М. Ф. Романова и В. С. Степанов, Труды ВНИИМ 26, 43 (1955); М. Ф. Романова, Опт. и спектр. 3, 457 (1957).
51. С. Л. Мандельштам, ДАН 18, 559 (1938); Изв. АН СССР, сер. физ. 4, 150 (1940); А. Д. Сахаров, Изв. АН СССР, сер. физ. 12, 372 (1948); Н. С. Абрамсон и С. Л. Мандельштам, Изв. АН СССР, сер. физ. 11, 223 (1947); И. В. Дворникова, Изв. АН СССР, сер. физ. 22, 677 (1958).
52. С. Л. Мандельштам, Н. К. Суходрев и В. П. Шабанский, Материалы X совещания по спектроскопии, Львов (1958); Е. Н. Никонова и В. К. Прокофьев, Опт. и спектр. 1, 298 (1956); Н. К. Рудневский, Опт. и спектр. 4, 296 (1958).
53. Д. Б. Гуревич и В. К. Прокофьев, Опт. и спектр. 2, 417 (1957).
54. С. Л. Мандельштам, Н. Н. Семенов и З. М. Туровцева, Журн. аналит. хим. 11, 10 (1956); А. Н. Зайдель, Н. И. Калитеевский, Л. В. Липис, М. П. Чайка и Ю. И. Беляев, Журн. аналит. хим. 11, 31 (1956); А. Н. Зайдель, Вестник ЛГУ, № 16, 45 (1956).
55. С. Л. Мандельштам и О. Б. Фалькова, Заводск. лаб. 4 (1956); О. Б. Фалькова, Изв. АН СССР, сер. физ. 19, 2 (1955); Н. Г. Герасимова, Т. Ф. Иванова, Н. С. Свентицкий, Г. П. Старцев, К. И. Таганов, М. Э. Трентовиус, Изв. АН СССР, сер. физ. 19, 147 (1955); Н. С. Свентицкий, К. А. Сухенко, П. П. Галонов, О. Б. Фалькова, М. С. Аппатов, К. П. Таганов, Заводск. лабор. 6 (1956).
56. А. Н. Зайдель и А. А. Петров, Журн. техн. физ. 25, 2571 (1955); А. Н. Зайдель, Вестник ЛГУ, № 16, 45 (1956); А. Н. Зайдель и А. А. Петров, Вестник ЛГУ, № 10, 40 (1957); А. Н. Зайдель, А. А. Петров и Г. В. Вейнберг, Спектрально-изотопный метод определения водорода в металлах, Изд. ЛГУ, 1957.
57. А. Г. Жиглинский, А. Н. Зайдель и М. П. Чайка, Опт. и спектр. 4, 152 (1958); А. Н. Зайдель, Опт. и спектр. 4, 701 (1958).
58. С. Э. Фриш, Е. Я. Шрейдер, Изв. АН СССР, сер. физ. 13, 465 (1949); С. Э. Фриш, Вестник ЛГУ, № 6, 26 (1950); Изв. АН СССР, сер. физ. 18, 252 (1954); О. П. Бочкова, Изв. АН СССР, сер. физ. 18, 252 (1954); О. П. Бочкова и Е. Я. Шрейдер, Изв. АН СССР, сер. физ. 19, 75 (1955); О. П. Бочкова, Л. П. Разумовская и С. Э. Фриш, Опт. и спектр. 5, 93 (1958); О. П. Бочкова и Е. Я. Шрейдер, Спектральный анализ газовых смесей, Гостехиздат, М., 1955.
59. В. К. Прокофьев, Изв. АН СССР, сер. физ. 18, 643 (1954); 22, 737 (1958).
60. Ф. М. Герасимов, И. А. Тельтевский, С. С. Наумов, С. Н. Си-жарский и С. В. Несмелов, Опт. и спектр. 4, 779 (1958).