

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

Несколько замечаний об излучении зарядов и мультиполей, равномерно движущихся в среде

В.Л. Гинзбург

Классическая теория, открытого в 1934 г. эффекта Вавилова – Черенкова (ВЧ), была построена в 1937 г. И.Е. Таммом и И.М. Франком [1]. Для энергии, излучаемой в единицу времени, ими была получена формула

$$\frac{dW}{dt} = \frac{q^2 v}{c^2} \int_{vn(\omega)/c \geq 1} \left[1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\omega)} \right] \omega d\omega, \quad (1)$$

где q — заряд частицы, движущейся с постоянной скоростью v в однородной, изотропной, немагнитной, прозрачной среде с показателем преломления $n(\omega)$ на циклической частоте ω ; интегрирование в (1) ведется по частотам, для которых $vn(\omega)/c \geq 1$, т.е. существует излучение ВЧ, происходящее под углом $\theta_{\text{ВЧ}}$, причем $\cos \theta_{\text{ВЧ}} = c/vn(\omega)$.

В статье [1] сделана оценка излучаемой мощности с использованием выражения

$$n^2(\omega) = 1 + \frac{A}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (2)$$

Очевидно, частотная дисперсия, т.е. зависимость n от ω , в (1) учтена. Сделано это, безусловно, правильно, а формула (1) получается при расчете и двумя другими методами [2, 3]. В этой связи недоразумением является содержащееся в недавно опубликованной статье [4] утверждение о том, что теория эффекта ВЧ в диспергирующей среде "была впервые развита (first derived)" только в работах Тамма [5] и Ферми [6]. В статье же [1] якобы показатель преломления считался независящим от частоты¹. Статью [1] авторы [4] явно не видели. Источником подобной ошибки послужила, очевидно,

статья Г. Афанасьева и др. [7], на которую авторы [4] и ссылаются. Действительно, статья [7] начинается с утверждения, что Тамм и Франк [1] "рассмотрели движение заряда в среде с постоянной электрической проницаемостью (electric permittivity)", т.е. без учета дисперсии. Это не описка, ибо в статье Афанасьева [8] так и утверждается, что "Tamm and Frank did not, however, formulate the dispersion mathematically". Сказанное не помешало авторам [7] всю свою статью посвятить анализу именно формулы (1) с использованием выражения (2), приведенных в [1] (см. формулы (4.2) и (1.1) в [7]). Этот анализ подробнее известного мне по литературе и полезен, но почему он должен был опираться на упомянутую неверную характеристику работы [1] — выше моего понимания. Заметка [8] в целом, помещенная в научно-популярном журнале, может только ввести в заблуждение читателей, не знакомых с теорией эффекта ВЧ, и вызывает удивление у тех, кто эту теорию знает. Так, автор [8] утверждает, что в работе [4] якобы показано, что излучение ВЧ "может излучаться также электрическими диполями, движущимися медленнее скорости света", а равномерно движущийся заряд вообще может "излучать независимо от его скорости". Между тем прописной истиной является утверждение, что в случае эффекта ВЧ равномерно движущийся заряд может излучать только, если его скорость больше фазовой скорости рассматриваемых волн в среде. Лишь ознакомившись со статьей [7], на которую в [8] явных ссылок нет (имеется только ссылка на статью [4]), удалось понять, что же имеется в виду.

Сделаем в этой связи несколько замечаний. Под излучением ВЧ в узком смысле понимается оптическое излучение, возникающее в среде при прохождении через нее заряженных частиц со скоростью $v > c/n(\omega)$, где ω — частота рассматриваемого излучения. Но, как это обычно подчеркивалось и подчеркивается (см., например, [2, 3, 5, 9, 10]), в широком смысле эффект ВЧ есть излучение любых волн, возникающее при равномерном движении любых источников со скоростью, превосходящей фазовую скорость рассматриваемых волн. В этом смысле, например, волны Маха есть акустический эффект ВЧ, или, если угодно, аналог оптического эффекта ВЧ в акустике. Кстати, сказанное было подчеркнуто уже в статье [5]. Поэтому даже на начальном этапе развития теории было ясно, что эффект ВЧ будет иметь место, если источником является не заряд, а магнитный

¹ В статье [4] угол $\theta_{\text{ВЧ}}$ ошибочно считается не углом между v и k (волновым вектором), а углом между v и волновым фронтом.

В.Л. Гинзбург. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Ленинский просп. 53, Российская Федерация
Тел. (095) 135-85-70
Факс (095) 135-85-33
E-mail: ginzburg@lpi.ru

Статья поступила 6 декабря 2001 г.

диполь [11], электрический диполь [12] и, конечно, любой мультиполь. Источником может быть и световой (электромагнитный) импульс, причем в этом случае роль скорости заряда v играет групповая скорость v_g , с которой движется импульс. Но, разумеется, в силу принципа суперпозиции, интенсивность ВЧ-излучения от светового импульса отлична от нуля только при учете нелинейности среды. Излучение таких импульсов уже довольно давно наблюдалось (см., например, [13]). Для меня новым в статье [4] явилось понимание возможности в случае световых импульсов иметь в качестве источников мультиполи, в частности, электрические диполи. Между тем для всех известных частиц (включая нейтрон) магнитный момент и тем более другие мультипольные моменты так малы, что изучение их излучения ВЧ, как считается, не представляет реального интереса (об этом см. также ниже).

Разумеется, мультиполи и, в частности, электрический диполь импульса порождают ВЧ-излучение с частотой ω только, если $v_g > c/n(\omega)$. Однако при учете дисперсии это, в принципе, возможно и в случае, если $v_g < c_{ph}(0) = c_0 = c/n(0)$. Здесь мы пользуемся обозначениями из [4], где, очевидно, $c_0 = c/n(0)$ — фазовая скорость электромагнитных волн в пределе сколь угодно низких частот. Режим, при котором скорость частиц v или групповая скорость v_g меньше c_0 , авторы именуют досветовым (subluminal), а излучение при $v_g > c_0$ называют сверхсветовым (superluminal). Мне такая терминология представляется крайне неудачной и могущей лишь порождать недоразумения. Но, разумеется, терминология — дело условное. Существенно лишь, что утверждение о ВЧ-излучении диполя "при его движении со скоростью, меньшей скорости света" означает лишь, что диполь излучает и при $v_g < c_0$, но, разумеется, излучает только волны, в спектре которых имеются частоты ω , удовлетворяющие условию $v_g > c/n(\omega)$.

Что касается утверждения о возможности излучения ВЧ при любой скорости частицы v [8], то оно просто основано на использовании выражения (2), согласно которому вблизи резонанса показатель $n(\omega)$ может быть сколь угодно велик, а значит, скорость $c_{ph} = c/n(\omega)$ сколь угодно мала. Сказанное очевидно, и замечать, что Ферми, один из крупнейших физиков прошлого века, не смог прийти к этому заключению, следующему из его работы (*although Fermi failed to reach this conclusion himself, it follows inevitably from his work*) просто несерьезно. Дело, конечно, в том, что достаточно близко к резонансу нужно учитывать поглощение, и выражение типа (2) неприменимо. Вытекающие отсюда последствия всем (и, во всяком случае, Ферми) всегда были ясны.

После открытия и объяснения эффекта ВЧ прошло уже более 60 лет, и поэтому, видимо, давным-давно понятые вопросы начинают обсуждаться вновь. Помимо вышеизложенного это относится к статье А.А. Тяпкина [14]. Речь идет о микротеории эффекта ВЧ.

Механизм излучения ВЧ с точки зрения микротеории был понят на самом раннем этапе развития теории. Так, в статье Тамма [5] отмечено (с. 79 русского издания): "С точки зрения микроскопической теории рассматриваемое излучение не испускается непосредственно электроном, а имеет своей причиной когерентные колебания молекул среды, возбуждаемые электроном". Прочитав-

ровав в [14] эту фразу, А. Тяпкин замечает: "Казалось бы, после такого конкретного и глубоко содержательного указания шефа сотрудникам Теоретического отдела ФИАН следовало бы непосредственно заняться вычислением механизма возбуждения колебаний в молекуле или хотя бы усвоить категорическое утверждение шефа, что "рассматриваемое излучение не испускается непосредственно электроном". Но никто из последователей Тамма даже не обратил внимания на столь важное указание". На самом же деле в школе Мандельштама — Тамма, к которой я имею честь принадлежать, хорошо знали, в отличие от А.А. Тяпкина, что такое с микроскопической точки зрения показатель преломления $n(\omega)$, и когда нужно или не нужно применять микроэлектродинамику, а когда достаточно использовать макроскопическую электродинамику (или по другой терминологии, электродинамику сплошных сред [15]).

Введение показателя $n(\omega)$ имеет смысл учета интерференции вторичных волн, рассеиваемых всеми атомами ("осцилляторами") среды, и первичной падающей на среду волны. Здесь, для конкретности, имею в виду микроскопический расчет преломления волны на плоской границе раздела, скажем, вакуума со средой с показателем преломления $n_2(\omega)$. Закон преломления $\sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ получается (см. [16, § 74], где указана и оригинальная литература; см. также [17, § 69]) в результате "погашения" в среде первичной (падающей) волны и замене ее преломленной волной с фазовой скоростью $c_{ph} = c/n_2(\omega)$; появляется и отраженная волна. Расчет достаточно громоздок и, конечно, после того как вопрос выяснен, совершенно не нужен, поскольку введение показателя $n(\omega)$ и соответствующих макроуравнений автоматически все учитывает. Однако понимание смысла и возможности микрорасчета не излишне, поскольку в случае некоторых усложнений и уточнений микрорасчет может понадобиться (примером может послужить анализ отклонений от формул Френеля; см. [17, § 70]). В случае эффекта ВЧ расчет [1] вполне адекватен задаче и полностью учитывает роль среды в используемом приближении. Поскольку для заряда не были известны, и мне неизвестны до сих пор задачи, для решения которых были бы основания сомневаться в точности расчетов [1], какая-то микротеория излучения ВЧ, насколько знаю, и не развивалась. Кстати, тот факт, что макротеория эффекта ВЧ для зарядов, как известно, не требует уточнений, не вполне тривиален. Дело в том, что, как было показано [18], при движении заряда не в сплошной среде, а в достаточно тонком пустом канале в этой среде, наличие канала не оказывается на излучении. Отсюда следует, что для ВЧ-эффекта для заряда непосредственная окрестность траектории не играет роли и поэтому нет оснований выходить за пределы макротеории. Для мультиполей, причем уже для магнитного и электрического диполей, это уже не так — излучение при движении в каналах, вообще говоря, отлично от излучения в сплошной среде. Поэтому для мультиполей анализ излучения ВЧ в общем случае требует специального рассмотрения близкой к источнику области и тем самым выхода за пределы макроподхода. Затронутый здесь круг вопросов обсуждается в [3, гл. 7]. Исследование ВЧ-излучения мультиполей не доведено до конца в связи с уже упоминавшейся малостью эффекта ВЧ для известных частиц с мультипольными моментами. Использование световых импульсов [4, 13] открывает

возможности исследовать ВЧ-излучение мультиполей², но уже, очевидно, не микроскопических. Задачи здесь совсем другие (см., в частности, [3, гл. 7]).

В публикуемой в этом номере УФН статье [19] и в некоторых других публикациях обсуждался вопрос, является ли излучение ВЧ "собственным излучением" быстрой частицы или излучением среды, возбуждаемым этой частицей. При этом авторы [19] считают излучение ВЧ собственным излучением частицы. Разумеется, для появления ВЧ-излучения частицы нужны и сама частица (источник энергии), и среда. Поэтому вопрос, что важнее, является несколько схоластическим. Однако, я считаю, более физически обоснованным, хотя и необязательным, считать излучение ВЧ все же излучением среды. Это особенно разумно, учитывая, что эффект ВЧ имеет место и без всякого источника-частицы, а, например, в случае источника-светового импульса (см. выше). Такая же точка зрения принята в [15, § 115].

В своей статье [14] А. Тяпкин остановился также на развитой мной квантовой теории излучения ВЧ [11] (см. также [2, 3]). Он объявил, что я "получил, естественно, заведомо ложные квантовые поправки, на абсурдность которых до сих пор никто не обратил внимания. Самое удивительное, что и Тамм в своих последующих работах продолжал ссылаться на эту статью [23] (это ссылка [11] в списке литературы в настоящем письме — В.Л.Г.), не заметив, что она была построена в полном противоречии с его справедливым утверждением о вторичной природе возникновения фотонов черенковского излучения". Показать, почему же полученные в [11] поправки "заведомо ложные", А. Тяпкин не счел нужным. Впрочем, он вообще ничего не продемонстрировал, кроме непонимания того, что в [11], как и в цитируемой им работе [20], квантуется макроскопическая, а не микроскопическая электродинамика в среде. Поэтому импульс "фотона в среде" с самого начала получается равным

$$\hbar \mathbf{k} = \frac{\hbar \omega n(\omega)}{c} \frac{\mathbf{k}}{k}, \quad (3)$$

а не равным $\hbar \omega / c$, как в вакууме. Важно, что именно импульс (3) получается автоматически [11, 20] при квантовании уравнений макроскопической электродинамики. Вместе с тем, импульс (3) состоит из двух частей, одна из которых связана с полем, а другая — со средой [21]. Думаю, что рассмотрение, предпринятое в [11], правильно, но все же его точность *a priori* недостаточно ясна. Поэтому, быть может, целесообразно какое-то микроскопическое обоснование использованного подхода на базе микроскопической квантовой электродинамики (это уже было отмечено мной в примечании при корректуре к препринту [22]). На данном же этапе квантовые поправки порядка $\hbar \omega / mc^2$ и т.д., указанные в [11] и частично приведенные также в [10, 23], — это лучшее, что предложено. Другое дело, что эти поправки очень малы во всех известных реальных условиях и поэтому не представляют интереса. Критика же по этому поводу, содержащаяся в [14], абсолютно ни на чем не основана. Кстати, расчеты [20] для интенсивности излучения ВЧ, как уже указывалось, сделаны на той же основе, что и в [11], и к тому же явно не точны.

² В [4] речь идет об электрических диполях, однако использование эллиптически поляризованного поля в импульсе позволяет, вероятно, изучать также магнитные диполи и мультиполи.

Действительно, в [20] приведено лишь выражение (формула (3.14)) для интенсивности в классическом пределе (т.е. без всяких квантовых поправок), но отличающееся от (1) дополнительным множителем u_λ/U_λ (u_λ — фазовая и U_λ — групповая скорости света). Поскольку результат (1), безусловно, верен, в [20] в этом пункте, несомненно, допущена ошибка.

Отмечу, что в статье [24], любезно присланной мне Г.Н. Афанасьевым вместе со статьями [7] и [25], дается ссылка на отмеченную в 1993 г. А. Тяпкиным возможность какого-то дополнительного излучения, возникающего при скорости частицы $v = c_{ph} = c/\sqrt{\epsilon\mu}$ (в обозначениях статьи [24] $c_{ph} = c_n$; дисперсия не учитывается). Таким образом, речь идет о самом пороге эффекта ВЧ. Я, однако, не смог усмотреть какой-то пороговой особенности для эффекта ВЧ. Если опираться на формулу (1), то никакого порогового эффекта, конечно, нет, и мощность излучения стремится к нулю при $v \rightarrow c_{ph}$. В статье [25] проведено более полное решение задачи, рассмотренной впервые Таммом [5], об излучении заряда, движущегося равномерно лишь на конечном отрезке времени, а значит, и пути. Проведенный анализ, насколько могу судить, является правильным и полезным.

Если среда однородна и стационарна (т.е. ее электромагнитные характеристики, например, $n(\omega)$, не изменяются во времени), то при равномерном движении источника (например, заряда) может возникать (разумеется, только при $v > c_{ph}$) лишь излучение ВЧ. Если же среда неоднородна или (и) нестационарна, то при равномерном движении источника, вообще говоря, возникает переходное излучение (см. [26], а также [2, 3, 9, 10, 15, 23, 27–29]). Разумеется, переходное излучение может существовать и интерферировать с излучением ВЧ. Несколько формальное, но наиболее общее объяснение переходного излучения таково. Ограничиваюсь для примера движением заряда, отметим, что в случае вакуума параметром, определяющим, так сказать, излучение, является отношение $\varkappa = v(t)/c$ скорости заряда $v(t)$ к скорости света в вакууме c . Из электродинамики следует, что при постоянстве скорости, т.е. при $v = \text{const}$ на всем интервале $-\infty < t < \infty$, излучение отсутствует. Для его появления необходимо изменение \varkappa , т.е. существование в прошлом или настоящем какого-то ускорения. При наличии среды определяющим параметром для излучения является отношение $\varkappa = v/c_{ph}$, где c_{ph} — фазовая скорость электромагнитных волн (вообще говоря, вместо c_{ph} можно выбрать и иную характеристику среды с размерностью скорости). Ограничиваюсь для простоты прозрачной средой, имеем $c_{ph} = c/n(\omega)$, и опять же излучение для $\varkappa < 1$ существует только при изменении параметра \varkappa во времени в месте нахождения заряда (источника) или в его окрестности, в которой формируется поле. Очевидно, такое изменение \varkappa возможно теперь не только при наличии ускорения (т.е. при зависимости v от времени), но и при зависимости от времени скорости c_{ph} в месте нахождения заряда. В случае пересечения зарядом границы раздела сред \varkappa изменяется, и возникает переходное излучение, рассмотренное раньше других типов такого излучения [26]. Меняется \varkappa и при прохождении заряда с постоянной скоростью через периодически изменяющуюся в пространстве среду [28]. Такое излучение иногда называют просто резонансным, но мне представляется более

уместным называть это излучение резонансным переходным излучением. Переходное излучение, возникающее при равномерном движении заряда вблизи неоднородностей (экранов, решетки и т.д.), часто называют дифракционным излучением. Опять же, как мне представляется, точнее говорить о переходном дифракционном излучении. Переходное тормозное излучение (см., например, [2, 27]) в статье [19] именуется поляризационным тормозным излучением. И в этом случае мне кажется предпочтительным термин "переходное тормозное излучение". Разумеется, выбор терминологии — это в значительной мере дело вкуса, и я не буду продолжать дискуссию на этот счет. Замечу лишь, что кажется соблазнительным называть переходным любое излучение равномерно движущегося источника в случае среды неоднородной в пространстве или (и) во времени. Однако, как отметил Б.М. Болотовский, под такое определение подпадало бы также излучение ВЧ в каналах или вблизи среды. Поэтому, по-видимому, точнее всего называть переходным любое излучение равномерно движущегося источника в среде или вблизи нее, кроме излучения ВЧ.

В связи с вопросом о терминологии напомню, что название "переходное излучение" возникло совершенно естественным образом, поскольку в первой задаче такого типа рассматривалось как раз излучение, появляющееся при переходе заряда из одной среды в другую [26]. Но каким будет излучение, если заряд пересекает не одну границу, а несколько границ, как это имеет место в случае "стопки" пластиинок, среды с хаотическими неоднородностями и т.п.? Очевидно, излучение сохраняет какие-то черты, характерные для излучения при пересечении одной границы раздела, но возникает также интерференция волн, испускаемых от разных границ. В пределе бесконечной неоднородной среды (но однородной "в среднем"), а физически говоря, для достаточно большой такой среды, интенсивность возникающего излучения пропорциональна пройденному зарядом пути. Какого-то переходного процесса в непосредственном смысле слова в подобных случаях нет. Поэтому в своей рецензии на настоящую заметку Б.М. Болотовский высказал мнение, что правильнее говорить просто о резонансном излучении, а не о переходном резонансном излучении (речь идет об излучении равномерно движущегося источника в периодически неоднородной среде [28]). Я, однако, предпочитаю термин "переходное резонансное излучение", поскольку он представляется мне более информативным. Аналогично, в случае заряда, излучающего при равномерном движении над дифракционной решеткой, мне представляется предпочтительным термин "переходное дифракционное излучение", а не просто "дифракционное излучение". В обоих случаях прилагательное "переходное" сразу же поясняет, что речь идет о равномерно движущемся источнике (заряде), поскольку напоминает об исходном, так сказать, переходном эффекте [26]. Под резонансным же или дифракционным излучением, если нет соответствующих уточнений, совершенно не ясно, что же нужно понимать. Но, разумеется, подобные аргументы не доказательны, и какую выбрать терминологию — это дело вкуса, если суть вопроса или характер рассматриваемой задачи

достаточно пояснены. Кстати, то же относится и к эффекту Вавилова — Черенкова, ибо, как уже было отмечено в начале настоящего письма, под этим термином понимают и характерное оптическое излучение в прозрачной изотропной среде, и более общий случай — излучение различных волн при равномерном движении их источника со скоростью, превосходящей фазовую скорость этих волн в данной среде. Иногда такое расширительное понимание, например, в случае излучения продольных (плазменных) волн в изотропной плазме, может привести к недоразумениям. Но опять же, при уточнении постановки задачи и терминологии, все становится на свои места.

Список литературы

1. Тамм И Е, Франк И М *ДАН СССР* **14** 107 (1937); Tamm I E, Frank I M *C.R. Acad. Sci. USSR* **14** 109 (1937); см. также: Тамм И Е *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1975) с. 68
2. Гинзбург В Л *УФН* **166** 1033 (1996); см. также: Гинзбург В Л *О науке, о себе и о других* 2-е изд. (М.: Физматлит, 2001) с. 67
3. Гинзбург В Л *Теоретическая физика и астрофизика* 3-е изд. (М.: Наука, 1987) (Англ. перевод: Ginzburg V L *Applications of Electrodynamics in Theoretical Physics and Astrophysics* 2nd rev. Engl. ed. (New York: Gordon and Breach Science Publ., 1989))
4. Stevens T E et al. *Science* **291** 627 (2001)
5. Tamm J. *J. Phys. USSR* **1** 439 (1939); Тамм И Е *Собрание научных трудов* Т. 1 (М.: Наука, 1975) с. 77
6. Fermi E *Phys. Rev.* **57** 485 (1940)
7. Afanasiev G N, Kartavenko V G, Magar E N *Physica B* **269** 95 (1999)
8. Afanasiev G N *Phys. World* **14** (4) 26 (2001)
9. Франк И М *Излучение Вавилова — Черенкова (вопросы теории)* (М.: Наука, 1988)
10. Зрелов В П *Излучение Вавилова — Черенкова и его применение в физике высоких энергий* (М.: Атомиздат, 1968)
11. Гинзбург В Л *ЖЭТФ* **10** 589 (1940); Ginzburg V L *J. Phys. USSR* **2** 441 (1940)
12. Франк И М *Изв. АН СССР. Сер. Физ.* **6** 3 (1942)
13. Auston D H et al. *Phys. Rev. Lett.* **53** 1555 (1984)
14. Тяпкин А А *ЭЧАЯ* **32** 947 (2001)
15. Ландау Л Д, Лищниц Е М *Электродинамика сплошных сред* (М.: Наука, 1992)
16. Борн М *Оптика* (Харьков: ОНТИ НКТП, 1937)
17. Сивухин Д В *Общий курс физики*. Т. 4 *Оптика* (М.: Наука, 1980)
18. Гинзбург В Л, Франк И М *ДАН СССР* **56** 699 (1947)
19. Платонов К Ю, Флейшман Г Д *УФН* **172** 241 (2002)
20. Tidman D A *Nucl. Phys.* **2** 289 (1956/57)
21. Гинзбург В Л *УФН* **110** 309 (1973)
22. Гинзбург В Л "Недодуманное, недоделанное...", Препринт ФИАН № 34 (М.: ФИАН, 2001)
23. Jelley J V *Cherenkov Radiation, and Its Application* (New York: Pergamon Press, 1958) [Русский перевод: Джелли Дж *Черенковское излучение и его применения* (М.: ИЛ, 1960)]
24. Afanasiev G N, Eliseev S M, Stepanovsky Y P *Proc. R. Soc. London Ser. A* **454** 1049 (1998)
25. Afanasiev G N, Kartavenko V G, Ruzicka J *J. Phys. A: Math. Gen.* **33** 7585 (2000)
26. Гинзбург В Л, Франк И М *ЖЭТФ* **16** 15 (1946) [Краткая англ. версия: Ginzburg V L, Frank I M *J. Phys. USSR* **9** 353 (1945)]
27. Гинзбург В Л, Цытович В Н *Переходное излучение и переходное рассеяние* (М.: Наука, 1984) [Дополненный англ. перевод: Ginzburg V L, Tsytovich V N *Transition Radiation and Transition Scattering* (Bristol: A. Hilger, 1990)]
28. Тер-Микаелян М Л *Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях* (Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1969)
29. Тер-Микаелян М Л *УФН* **171** 597 (2001)