

Виркатор с баллистической фокусировкой электронного пучка

© В.Д. Селемир, А.Е. Дубинов, Б.Г. Птицын, А.А. Евсеенко, И.А. Ефимова, В.А. Летягин,
Р.К. Нургалиев, Н.В. Степанов, К.С. Шилин, А.В. Ячный

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607190 Саров, Нижегородская область, Россия
e-mail: dubinov@ntc.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 17 июня 2003 г.)

На базе безжелезного линейного индукционного ускорителя создан мощный СВЧ генератор типа виркатор. Особенностью данного виркатора является баллистическая фокусировка электронного пучка в диодной системе с концентрическими сферическими катодом и анодом. Продемонстрирована способность такого виркатора генерировать мощные СВЧ импульсы.

Введение

СВЧ генераторы с виртуальным катодом (ВК) — виркаторы образуют один из основных классов генераторов в сверхмощной релятивистской сильноточной СВЧ электронике. Обзор современного состояния их развития представлен в [1].

В настоящее время виркаторы реализованы на базе высоковольтных наносекундных генераторов, построенных по схеме одиночных и двойных формирующих линий [2,3], индуктивных накопителей с плазменными прерывателями токов [4,5] или взрывомангнитных генераторов [6,7]. В одной из наших недавних работ был создан и исследован виркатор на базе безжелезного линейного индукционного ускорителя (ЛИУ „Корвет“) [8], причем конструкция виркатора была традиционной, с плоскопараллельным диодом.

В диоде с плоскопараллельными электродами обычно происходит радиальное расширение пучка, что приводит к потере электронов в области взаимодействия и уменьшению заряда ВК. Для уменьшения этих потерь иногда применяют внешнее продольное магнитное поле [9], но это требует подключения большого числа дополнительного оборудования (соленоиды, системы их питания и синхронизации). Другой метод уменьшения потерь электронов — обеспечение пинчевания пучка [3] часто труднодостижим ввиду необходимости создания токов большой величины.

В связи с этим представляет интерес применение диодов с иной, отличной от плоскопараллельной конфигурацией, например цилиндрической или сферической, с радиально сходящимся пучком, в которых баллистическая фокусировка электронов к центру частично уменьшает потери электронов.

СВЧ генераторы с цилиндрическими диодами достаточно хорошо изучены [1,10,11], но виркаторы со сферическим диодом ранее нигде не исследовались. Здесь же уместно отметить работу [12], в которой теоретически рассмотрен прибор с ВК со сферическим диодом для целей коллективного ускорения ионов.

Таким образом, в настоящее время представляется интересным вопрос, будет ли осуществляться баллистическая фокусировка электронов к центру сферического диода виркатора и может ли виркатор с таким диодом быть источником мощного СВЧ излучения. Целью настоящей работы являлось создание и первичное исследование виркатора со сферическим диодом. В рамках этого предполагалось изучить пространственное распределение электронов в области дрейфа, провести измерения параметров СВЧ излучения и тока в диоде.

Конструкция виркатора со сферическим диодом

Виркатор с баллистической фокусировкой электронного пучка был создан на базе ЛИУ „Корвет“, способного ускорять электронный пучок до энергии 900 keV при длительности импульса тока 40 ns.

Схема виркатора приведена на рис. 1. Он включал в себя диодный узел, состоящий из концентрических сферических анода и катода, дрейфового пространства и устройства для вывода излучения в виде рупорной антенны.

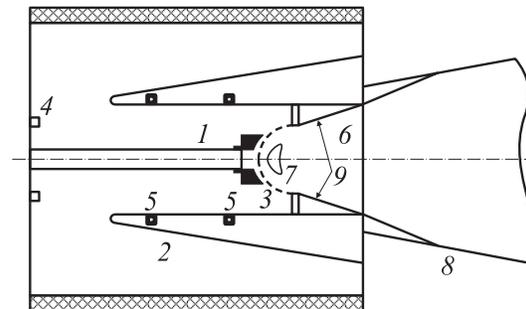


Рис. 1. Схема релятивистского сферического виркатора на основе одного блока установки „Корвет“: 1 — катод, 2 — анод, 3 — сетка, 4 — катодный пояс Роговского, 5 — анодные пояса Роговского, 6 — дрейфовое пространство, 7 — ВК, 8 — рупор, 9 — сопрягающий конус.

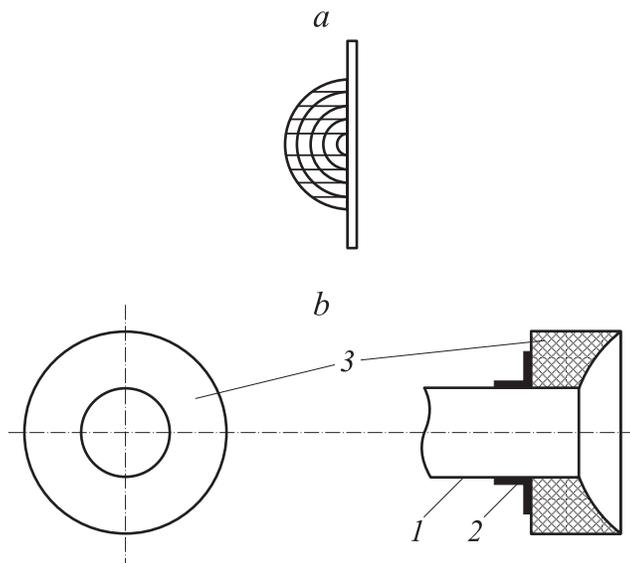


Рис. 2. *a* — конструкция сетки, *b* — конструкция катода: 1 — трубка, 2 — подложка, 3 — графитовый сегмент.

Катод (рис. 2, *b*) состоял из полый металлической трубки (позиция 1), к которой приварена стальная подложка (позиция 2) и графитового цилиндра (позиция 3) диаметром 70 мм с вогнутой торцевой сферической поверхностью радиусом 63 мм, с которой происходила эмиссия электронов. Центральная часть графитового цилиндра полая; диаметр цилиндрической полости составлял 30 мм для обеспечения лучшей баллистической фокусировки пучка и увеличения плотности потока электронов, приводящий к формированию виртуального катода в дрейфовом пространстве.

Анод представлял собой полый металлический цилиндр длиной 380 мм и диаметром 160 мм. В нем установлена сетка (рис. 2, *a*), которая изготовлена из провололок диаметром 0,8 мм, расположенных крестообразно и образующих полусферическую поверхность радиусом 50 мм. Расстояние между провололочками ~ 5 мм.

Анодный электрод заканчивался рупорной конической антенной с углом раскрытия излучающего рупора 10° . Диаметр выводного окна, выполненного из органического стекла, отделяющего вакуумный объем виркатора от внешнего воздушного пространства, составлял 700 мм. Давление остаточного газа внутри виркатора поддерживалось в диапазоне $(3 \dots 5) \cdot 10^{-5}$ Торр.

В зависимости от целей эксперимента сетка (позиция 3 на рис. 1) перемещалась по анодному цилиндру (позиция 2) вдоль его оси. Соответственно подстраивалось и положение катодного узла (позиция 1) путем изменения длины трубчатого держателя (позиция 1 на рис. 2, *b*), обеспечивая необходимую величину зазора катод–сетка. Концентричность сетки и торца катода обеспечивалась при зазоре между ними 13 мм.

Численное моделирование и исследование виркатора

Для проведения численного моделирования виркатора с баллистической фокусировкой использовался PIC-код KARAT [13]. Целью моделирования являлись изучение динамики пучка, механизмов СВЧ излучения и сравнение расчетных результатов с экспериментальными.

Геометрия моделируемой области представлена на рис. 3. Она соответствовала виркатору (рис. 1) и включала в себя катод, анод и сетку. Катодом являлся цилиндр с рабочей поверхностью в виде части сферы радиусом 63 мм, с которой происходила эмиссия электронов. Диаметр торца катода составлял 70 мм. Катод располагался на трубчатом держателе длиной 270 мм. Анод — это цилиндр диаметром 380 мм, в который была установлена сетка, представляющая собой полусферическую поверхность диаметром 100 мм. Зазор катод–сетка варьировался от 10 до 15 мм с шагом 1 мм. Концентричность торца катода и сетки обеспечивалась при зазоре катод–сетка 13 мм.

К диодному промежутку прикладывался импульс напряжения длительностью 40 нс и величиной 900 кВ (профиль импульса соответствовал экспериментальной

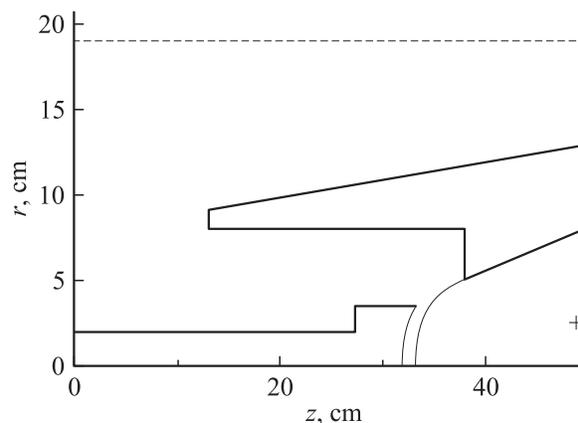


Рис. 3. Расчетная геометрия виркатора.

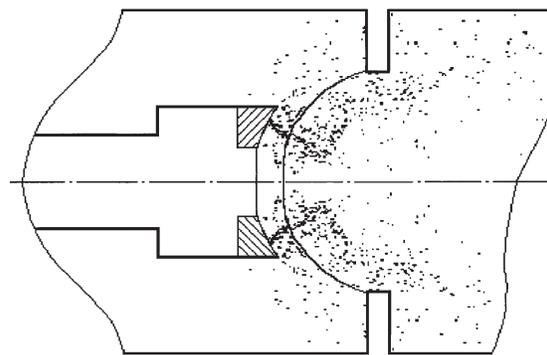


Рис. 4. Расчетное распределение электронной плотности.

осциллограмме), а диодный ток достигал 40 кА и имел ту же длительность.

Численное моделирование показало наличие баллистической фокусировки электронного пучка (рис. 4). В тот момент, когда ток достигал определенного значения (в полости происходило достаточное накопление заряда), образовывался ВК. Образование ВК происходило в течение первых 10 ns для всех величин диодных зазоров. Типичный фазовый портрет электронов пучка после формирования ВК приведен на рис. 5.

Момент возникновения ВК (10–12 ns) совпадал с началом генерации СВЧ излучения, момент распада ВК (37 ns) — с моментом прекращения генерации и связан с уменьшением плотности электронного облака, формирующего ВК.

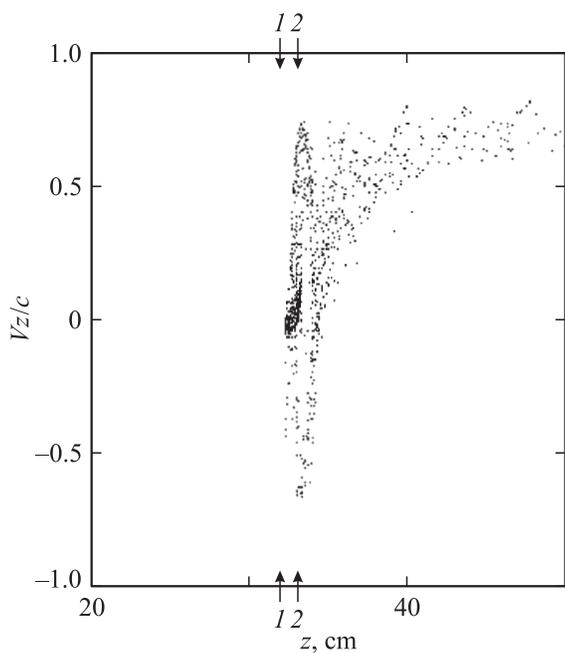


Рис. 5. Образование ВК (фазовый портрет): 1 — катод, 2 — сетка.

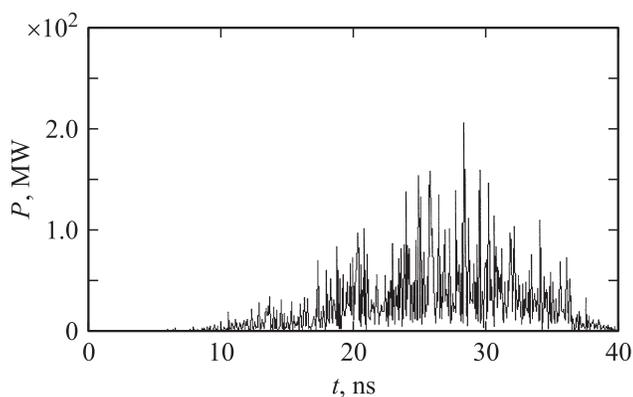


Рис. 6. Временная зависимость мощности излучения, рассчитанная по PIC-коду KARAT.

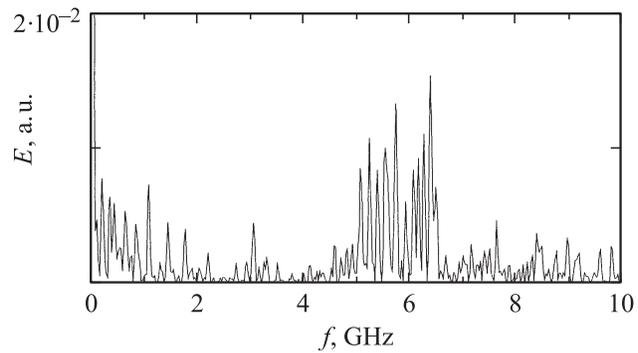


Рис. 7. Спектр выходного СВЧ излучения.

Расчетным способом в сечении $z = 50$ см определялась временная зависимость мощности СВЧ излучения. Данная зависимость приведена на рис. 6, когда зазор сетка–катод составлял 13 мм. Максимальная мгновенная мощность реализовывалась при зазорах катод–сетка 10 и 13 мм и составляла ~ 220 МВт. На рис. 7 представлен график спектра мощности излучения. Из него видно, что основная частота генерации лежит в диапазоне 5–6.5 GHz.

С помощью датчиков, расположение которых совпадало с расположением анодных поясов Роговского в виркаторе (позиции 5 на рис. 1), определяли пролетный ток в дрейфовом пространстве, для чего диодный узел перемещали влево. Максимальное значение тока в расчетах составило 5 и 2 кА соответственно для первого и второго датчиков.

Экспериментальное исследование генерационных характеристик виркатора в зависимости от геометрических параметров диодного узла

Экспериментальное исследование энергетических характеристик сферического виркатора проводилось для геометрии диода, приведенной на рис. 1, которая позволяла реализовать максимальные значения катодного тока. Особенности данной геометрии заключались в приближении диодного узла к входному окну рупорной антенны и наличии дополнительного сопрягающего конуса (позиция 9).

По мере изменения расстояния между катодом и сеткой измерялись параметры СВЧ излучения. Промежуток между катодом и сеткой изменялся от 11 до 16 мм. Регистрация энергии СВЧ излучения производилась при помощи калориметра. Для определения мощности СВЧ излучения использовались криогенные датчики на „горячих носителях“ [14], которые располагались на расстоянии ~ 2 м от рупора в свободном пространстве.

На рис. 8 показан сигнал с криогенного датчика, когда торец катода и сетка концентричны, т.е. при

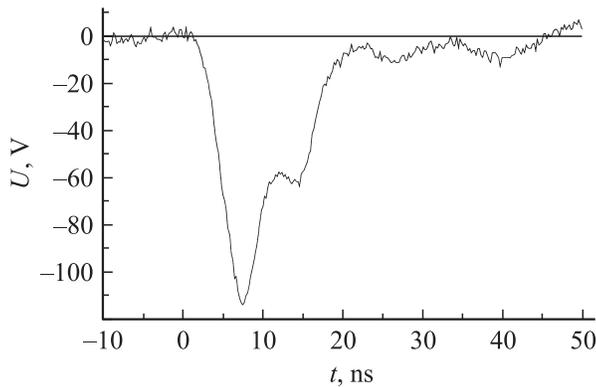


Рис. 8. Сигнал с криогенного датчика на „горячих носителях“ при зазоре катод–сетка 13 mm.

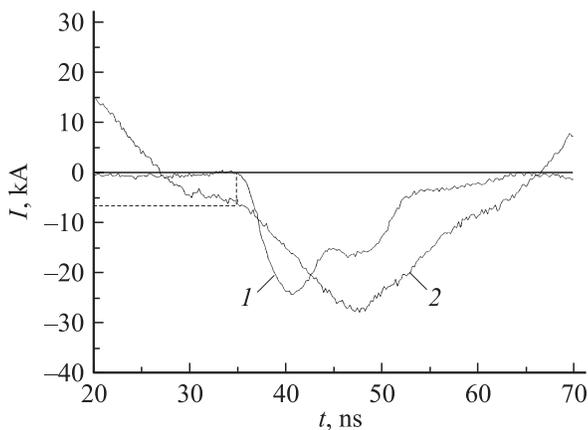


Рис. 9. Сигналы с криогенного датчика (1) и катодного пояса (2).

зазоре катод–сетка 13 mm. Энергия, зарегистрированная калориметром, составила 0.8 J. Длительность импульса излучения по основанию 30 ns. Вычислим среднюю мощность излучения СВЧ генератора $\bar{P} = W/t = 26$ MW. Пиковая (максимальная) мощность излучаемого СВЧ сигнала составила $P_n = 65$ MW. Это значение для других зазоров, когда не обеспечивалась концентричность поверхностей, оказалось ниже.

Значение максимальной пиковой мощности ниже, чем для виркатора с плоскопараллельными электродами, исследованного нами в работе [8]. Снижение связано с увеличением длительности импульса СВЧ сигнала. Кроме того, в данной работе не проводилась оптимизация конструкции диода в связи со сложной формой электродов, так как нас прежде всего интересовала возможность баллистической фокусировки пучка электронов. В будущем планируется провести такую оптимизацию для повышения пиковой мощности СВЧ излучения.

Для определения величины тока, при котором начинается СВЧ генерация, сигналы катодного пояса и криогенного датчика синхронизованы с погрешностью ~ 1 ns (рис. 9). Стартовый ток составил $I = 6.2$ kA. Аналогич-

ные оценки для плоской конфигурации диода виркатора дали величину 19 kA [8]. Таким образом, наличие баллистической фокусировки способствует образованию ВК.

Пролетный ток в дрейфовом пространстве определяли с помощью анодных поясов Роговского (позиции 5 на рис. 1), для обеспечения работоспособности которых диодный узел смещали к левому краю анода. Максимальные значения пролетного тока, зафиксированные первым и вторым анодными поясами, составили 5.2 и 1.3 kA соответственно. Расчетные значения равны 5 и 2.5 kA.

Аналитические формулы, позволяющие оценить границы спектра СВЧ излучения виркатора, известны лишь для плоской геометрии диодного узла [3]. В первом приближении их можно использовать и применительно к сферической форме электродов. Задавая величину зазора 13 mm и напряжение на нем 900 kV, получаем частоту СВЧ излучения 10 GHz. Результаты расчета спектра по PIC-коду KAPAT, приведенные на рис. 7, дают диапазон 5–6.5 GHz.

Баллистическая фокусировка пучка, анализ автографа пучка

Дополнительная информация о характере поведения электронного пучка в области формирования виртуального катода получена путем снятия его автографа. Для этого в дрейфовое пространство на оси ускорителя помещалась стеклянная пластина специальной формы, повторяющей геометрию засеточного пространства. Вид пластины и ее расположение в дрейфовом пространстве электродинамической системы показаны на рис. 10, а.

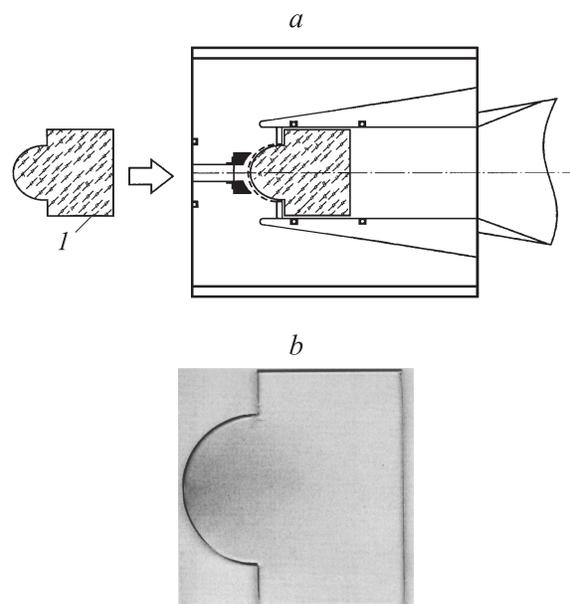


Рис. 10. Методика получения автографа пучка: а — пластина (1) и ее расположение в дрейфовом пространстве, б — отсканированное изображение пластины.

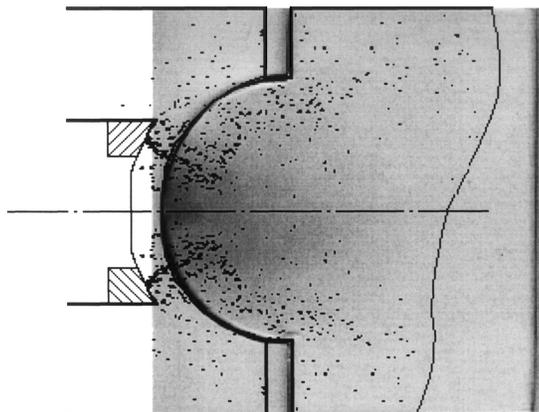


Рис. 11. Наложение расчетной плотности электронного облака на автограф пучка.

Характерные потемнения стекла, вызванные воздействием пучка, позволяют обнаружить области с наибольшей плотностью и энергией электронов. На рис. 10, *b* представлено отсканированное изображение пластины.

На рис. 11 приведено совмещение автографа электронного пучка, полученного посредством стеклянной пластины с изображением распределения электронного облака, произведенного компьютерным моделированием.

Более сильное потемнение на стекле наблюдается примерно там же, где зафиксирована наибольшая концентрация электронов, рассчитанная на основе РИС-кода KARAT. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность фокусировки электронного пучка посредством применения электродов сферической формы.

Заключение

В данной работе был впервые создан виркатор на базе безжелезного ЛИУ „Корвет“ с диодом, имеющим сферическую форму электродов. Экспериментально доказано, что наличие сферических электродов уменьшает потери электронов в области взаимодействия и способствует образованию ВК. В результате проведенных исследований получены следующие результаты: пиковая мощность ~ 65 MW; длительность микроволнового импульса по основанию 30 ns; пролетные токи, измеренные анодными поясами Роговского, 5.2 и 1.3 кА соответственно; частота СВЧ излучения 10 GHz.

Список литературы

- [1] Селемир В.Д., Дубинов А.Е. // РИЭ. 2002. Т. 47. № 6. С. 645.
- [2] Scarpetti R.D., Burkhart S.C. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1985. Vol. 13. N 6. P. 506.
- [3] Селемир В.Д., Алехин Б.В., Ватрунин В.Е. и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7–8. С. 689.
- [4] Жерлицын А.Г., Лопатин В.С., Лукьянов О.В. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 11. С. 69.

- [5] Жданов В.С., Бабкин А.Л., Галкин С.М. и др. // Тез. докл. XXV Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС. Звенигород, 1998. С. 169.
- [6] Азаркевич Е.И., Диденко А.Н., Долгополов П.В. и др. // ДАН СССР. 1991. Т. 319. № 2. С. 352.
- [7] Азаркевич Е.И., Диденко А.Н., Жерлицын А.Г. и др. // ТВТ. 1994. Т. 32. № 1. С. 127.
- [8] Селемир В.Д., Дубинов А.Е., Птицын Б.Г. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 11. С. 68.
- [9] Jiang W., Kitano H., Huang L., Masugata K., Yatsui K. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. Vol. 24. N 1. P. 187.
- [10] Jiang W., Woolverton K., Dickens J., Kristiansen M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. Vol. 27. N 5. P. 1538.
- [11] Жерлицын А.Г. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 22. С. 78.
- [12] Kawata Sh., Abe T., Kasuya K., Niu K. // J. Phys. Soc. Jap. 1979. Vol. 47. N 5. P. 1651.
- [13] Tarakanov V.P. // User's Manual for Code Karat. Springfield, VA: Berkley Research Associate Inc., 1992.
- [14] Райзер М.Д., Цонн Л.Э. // РИЭ. 1975. Т. 20. № 8. С. 1691.