

05;10;11;12

## Исследования характеристик металлокерамического катода

© Ю.А. Котов, С.Ю. Соковнин, М.Е. Балезин

Институт электрофизики УрО РАН,  
620016 Екатеринбург, Россия  
e-mail: sokovnin@iep.uran.ru

(Поступило в Редакцию 23 января 2002 г.)

Приведены результаты исследований влияния размера металлических частиц, плотности их распределения на поверхности керамики и типа керамики на различные характеристики металлокерамического (МК) катода для наносекундных ускорителей электронов. Показано, что МК катод имеет повышенную эмиссионную способность при относительно небольших значениях напряженности электрического поля в вакуумном диоде, что позволяет существенно обострить и увеличить ток пучка (мощность). Установлено, что имеется возможность управлять эмиссионными свойствами МК катода посредством изменения состава МК пластины.

### Введение

Создание мощных наносекундных генераторов с частотой следования импульсов до кГц и ресурсом до  $10^{10}$ – $10^{11}$  импульсов [1,2] обусловило разработки ускорителей электронов, перспективных для технологий [3,4].

Таким ускорителям требуются дешевые, имеющие высокий ресурс и воспроизводимые характеристики катоды. Для этой цели мы предложили и исследуем металлокерамический (МК) катод [5], представляющий собой таблетку диаметром 12 мм и толщиной 2 мм из оксидной нанокерамики, в которой относительно равномерно по объему распределены металлические частицы, часть которых выходит на поверхность. За счет существенной разницы в температурных коэффициентах линейного расширения у керамики и металла при остывании такой системы после синтеза вокруг металлических частиц образуются микрополости, которые служат, видимо, поставщиками газа при поверхностном образовании плазмы на МК катоде.

Первыми исследованиями такого катода было установлено [6,7], что он обладает высокой эмиссионной способностью (не ограничивает мощность ускорителя и обеспечивает высокую скорость нарастания тока при относительно небольшой площади эмиссии), позволяет получать высокую однородность распределения плотности электронов на аноде и обеспечивает обострение мощности ускорителя электронов (по сравнению с металлодиэлектрическим катодом тех же размеров с десятью эмиссионными центрами), который ранее использовался на ускорителе [4].

Здесь мы приводим результаты исследований влияния размера металлических частиц  $D$ , плотности  $n$  их распределения на поверхности и типа керамики на различные характеристики МК метода.

### Методика эксперимента

Использовался наносекундный ускоритель УРТ-0.5 [4]: ускоряющее напряжение  $U \leq 500$  кВ, длительность импульса на полувысоте  $t_{и} \sim 50$  пс, длительность фрон-

та импульса  $\tau_{10.1-0.9} = 46$  нс, частота срабатывания  $f \leq 200$  Hz. Давление в камере вакуумного диода составляло  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  Па, откачка производилась насосом АВР-50 без вымораживания масляных паров.

Конструкция катодного узла аналогична [6], МК пластина также ставилась ребром, но ее закрепление на катододержателе осуществлялось с помощью цапгового зажима. Фотография частиц из нержавеющей стали на поверхности МК пластины представлена на рис. 1.

В экспериментах использовалась измерительная система, описанная в [6]. Дополнительно регистрировалось интегральное распределение свечения плазмы на МК пластине фотоаппаратом „Зенит-Е“ с открытым затвором на фотопленке РФ-3 через прозрачное (из оргстекла марки „Сол“) окно в вакуумной камере, находящееся напротив МК пластины.

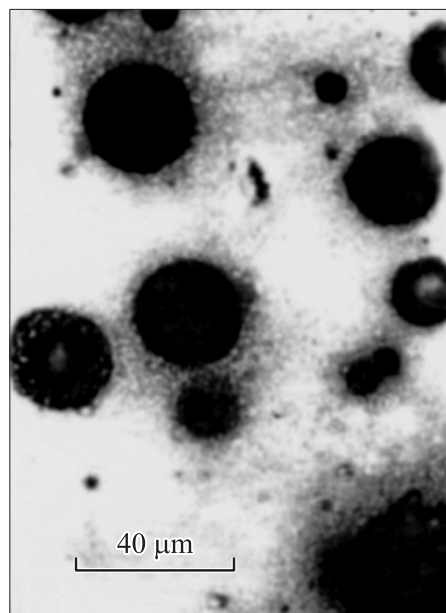


Рис. 1. Поверхность МК пластины.

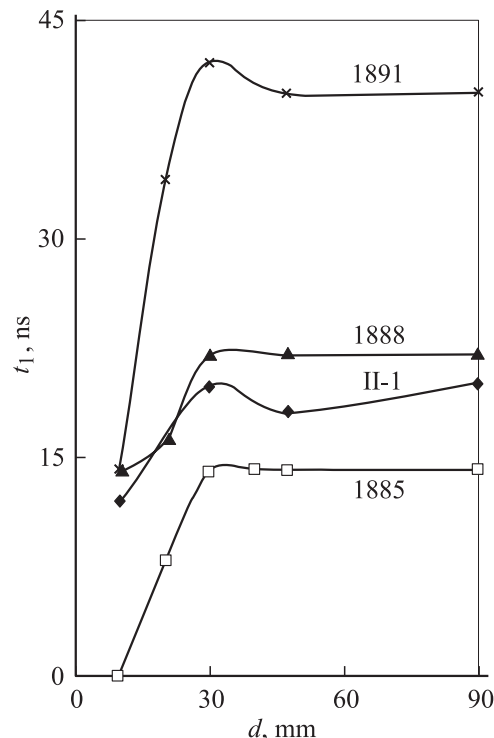
## Результаты экспериментов и их обсуждение

Параметры исследованных типов МК пластин приведены в табл. 1. Для всех типов МК катодов практически всегда имеется временная задержка  $t_1$  начала тока в диоде относительно напряжения (рис. 2, 3, *b*). Видно, что характер изменения  $t_1$  от расстояния катод–анод  $d$  (расстояние от кромки керамической таблетки высотой  $h$  до плоскости анода [6]) остается одним и тем же: в области  $d \leq 30$  мм время задержки нарастает с увеличением  $d$ , в области же  $d \geq 30$  мм  $t_1$  практически не изменяется с изменением  $d$  для всех типов исследованных катодов, что подтверждает наличие эффекта полного напряжения [6], который обусловлен как геометрией электродов, так и десорбцией газа, особенно из микрополостей.

Для  $\text{Al}_2\text{O}_3$  керамики  $t_1$  слабо увеличивается с ростом плотности частиц на поверхности МК катода (1885 и 1889 в табл. 2) и практически не зависит от размера частиц (1885, II-1). При изменении же типа керамики с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (относительная диэлектрическая постоянная  $\epsilon = 9.6$ ) на  $\text{TiO}_2$  ( $\epsilon = 170$ )  $t_1$  возросла почти в два раза (II-1 и 1891).

Это показывает коренное отличие рассматриваемого процесса от разряда вдоль поверхности диэлектрика в вакууме [8], где напряжение зажигания разряда и задержка появления тока разряда уменьшаются с ростом диэлектрической проницаемости и увеличением относительной высоты диэлектрической пластины в вакуумном зазоре.

Правильный выбор момента подключения нагрузки на этапе быстрого роста импеданса прерывателя тока любого типа позволяет улучшить условия работы пре-



**Рис. 2.** Временная задержка между приходом импульса напряжения и началом импульса тока для МК катодов разного состава от расстояния анод–катод. Цифры у кривых — номер катодов.

ривателя и увеличить выходную мощность [9]. Так как время обрыва тока используемого полупроводникового прерывателя лежит в пределах  $\tau = 30$  нс, увеличение  $t_1$  приводит вначале к росту выходной мощности, а затем к ее уменьшению (табл. 2), когда  $t_1 > \tau$ . В последнем случае максимум мощности достигается на заднем фронте напряжения (рис. 3, *a*, 1891).

Наблюдается практически линейная зависимость КПД передачи энергии от  $t_1$  (табл. 2). Однако для МК пластины 1891, где  $t_1 > \tau$ , увеличение КПД достигается за счет увеличения доли низкоэнергетичных электронов, формируемых на заднем фронте напряжения.

Максимум мощности ускорителя  $P_m$  достигается при МК катодах типа 1888–1890 (табл. 1) и в два раза превышает значение  $P_m$  для МДМ катода (рис. 3, *a*, табл. 2). МК катод позволяет получать существенно более высокие скорости нарастания тока, чем МДМ катод [7]: так, в наших экспериментах при  $d = 47$  мм средняя скорость нарастания тока  $di/dt$  (от момента его начала до уровня 0.9 от максимума напряжения) составляет 0.84 и  $1.7 \cdot 10^{10}$  А/с, а амплитуда тока 177 и 358 А для МДМ и МК катода 1888 соответственно. Одновременно происходит укорочение импульсов напряжения с 68 до 50 нс и тока с 92 до 44 нс (на полувысоте) для МДМ и МК катода 1888 соответственно.

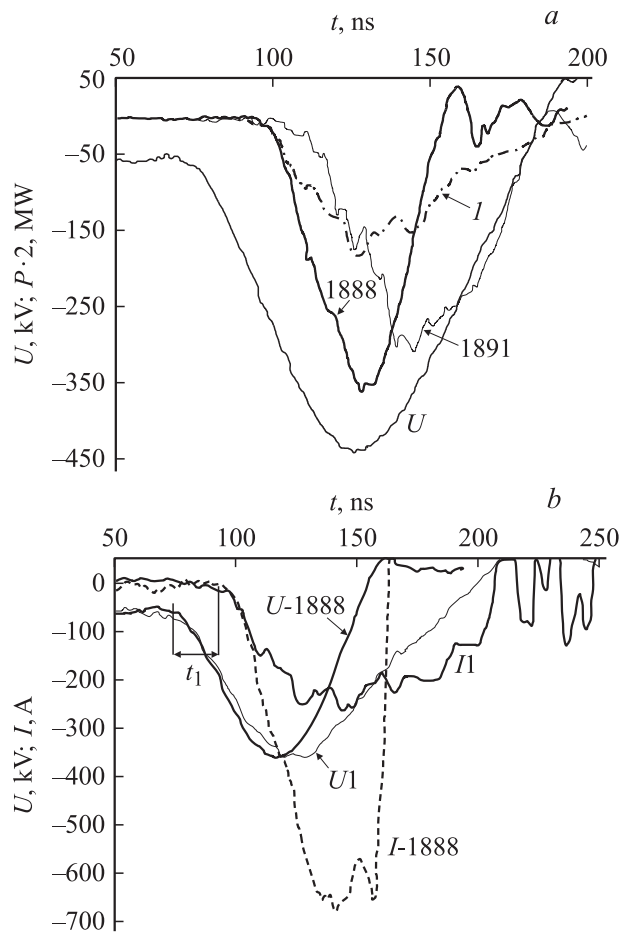
Так как скорости нарастания и амплитуды напряжения были в обоих случаях очень близки (рис. 3, *b*), можно заключить, что МК катод позволяет не только обострять,

**Таблица 1.** Исследованные типы МК катодов

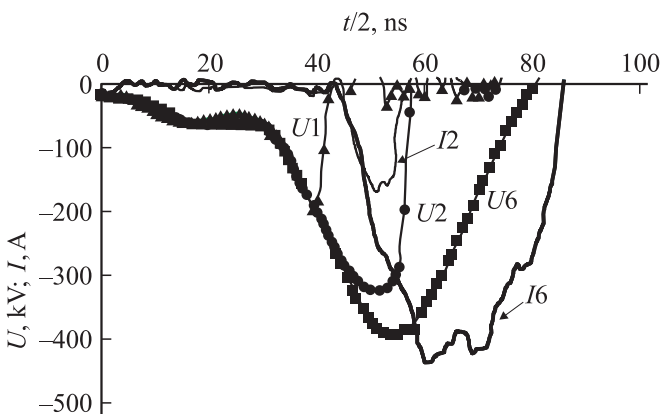
№ катода	Керамика	$D$ , $\mu\text{m}$	$n$ , $1/\text{cm}^2$
1885	$\text{Al}_2\text{O}_3$	9	1900
1886			
1887			
1888	$\text{Al}_2\text{O}_3$	9	40000
1889			
1890	$\text{Al}_2\text{O}_3$	26	4700
II-1			
1891			
1892	$\text{TiO}_2$	9	4020
1893			

**Таблица 2.** Результаты экспериментов для  $d = 47$  мм

№ катода	$t_1$ , ns	Мощность, MW	$I$ , A	Энергия в пучке, J	КПД передачи энергии в пучок, %
1891	40	155	428	6.73	30.3
1889	22	181	581	5.65	25.5
II-1	18	125	330	5.24	23.6
1885	14	137	556	4.97	22.4
MDM	14	91	251	4.33	19.5



**Рис. 3.** *a* — напряжение ( $U$  для катода 1891) и мощность в электронном пучке для различных катодов для расстояния  $d = 47$  mm, *b* — напряжения и ток для МДМ ( $I$ ) и МК катода 1888 для расстояния  $d = 47$  mm.



**Рис. 4.** Ускоряющее напряжение ( $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_6$ ), ток анода ( $I_2$  и  $I_6$ ) для разного количества секций вакуумного изолятора.

**Таблица 3.** Результаты расчетов и экспериментов для  $d = 47$  mm

№ образца	$t_1$ , ns	$U_{io}$ , kV	$E_{io}$ , kV/cm	$E_1$ , kV/cm	$U_0$	$R_{max}$ , $\Omega$
1885	14	149	4.93	2669	9.56	985
II-1	18	200	6.64	790	2.10	1106
1890	22	246	8.14	960	2.08	1037
1891	40	376	0.77	287	0.37	2227

но и увеличивать выходную мощность ускорителя. Причиной, объясняющей этот эффект, может быть более высокая и нарастающая с большей скоростью эмиссионная способность МК катода, обусловленная быстро увеличивающейся эмиттирующей плазменной поверхностью и/или высокой концентрацией плазмы.

Чтобы наблюдать работу МК катода без дуговой стадии, усложняющей интерпретацию экспериментальных данных, был организован срез импульса напряжения за счет пробоя вакуумного изолятора [10] (изменением числа его секций, рис. 4). Фотопленкой при этом регистрируется только слабое свечение в точках контакта МК пластины с катододержателем, даже при наложении 30 импульсов на один кадр. Это позволяет сделать вывод о начале поверхностного разряда с одних и тех же точек контакта МК пластины с катододержателем и о низкой концентрации плазмы на поверхности МК пластины.

Все эти данные позволяют заключить, что плазма с низкой концентрацией появляется практически одновременно на большой площади пластины, что и объясняет высокую эмиттирующую способность катода, а также высокий ресурс и хорошую воспроизводимость характеристик. Причиной появления плазмы на большой площади, видимо, является инициирование последовательного пробоя микропор у металлических частиц по МК пластине.

Выполненные расчеты показали (табл. 3), что время задержки  $t_1$  прямо пропорционально величине средней напряженности электрического поля  $E_{io}$  в момент начала тока в диоде по поверхности МК пластины между металлическими частицами одного диаметра  $D$ , что маловероятно и подтверждает гипотезу [6] о том, что главные события развиваются не на поверхности МК пластины, а в ее микропорах. Так, для одного  $D$  имеется (табл. 3) обратная зависимость  $t_1$  от средней напряженности поля  $E_1$  в микропоре шириной  $\delta$  ( $E_1 \sim E_{io}/(n^{0.5}\delta)$ ), что не противоречит имеющимся представлениям.

Можно отметить, что задержка появления тока при данной напряженности поля по порядку величины совпадает с задержкой при взрывной эмиссии [11], где  $t_1 \sim E^4$ , однако в нашем случае  $t_1 \sim E^2$ . Причины этого расхождения, видимо, предстоит выяснить.

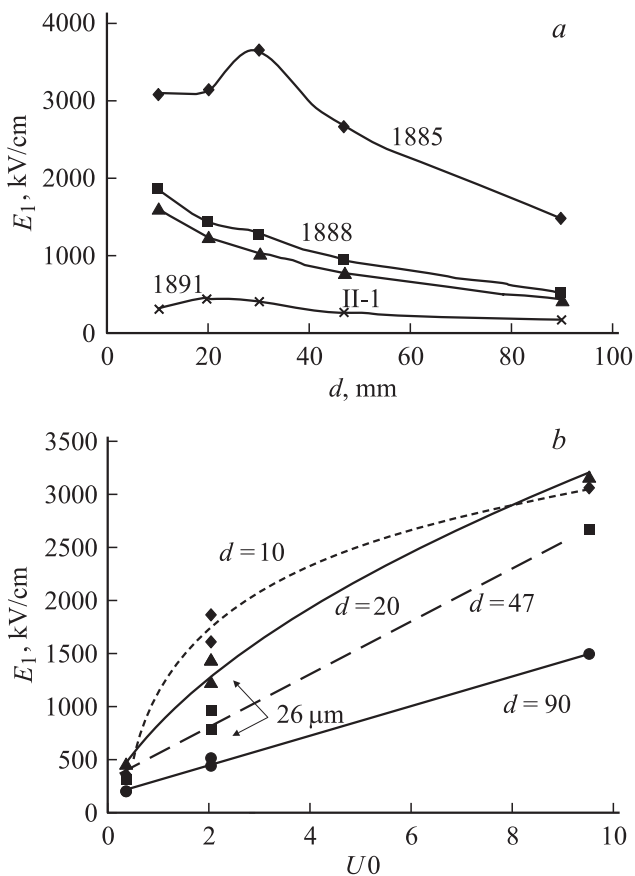
Если в качестве параметра взять безразмерное напряжение  $U_0 \sim 1/(\epsilon n^{0.5}D)$ , возникающее при зарядке одной частицы токами смещения при  $U_{io}$  (с учетом ее

емкости и размера  $D$ ), и построить зависимость средней напряженности поля в микропоре  $E_1$  от этого параметра (рис. 5,  $b$ ), видно, что при уменьшении  $d$  зависимость переходит от практически линейной к логарифмической, что можно объяснить эффектом полного напряжения.

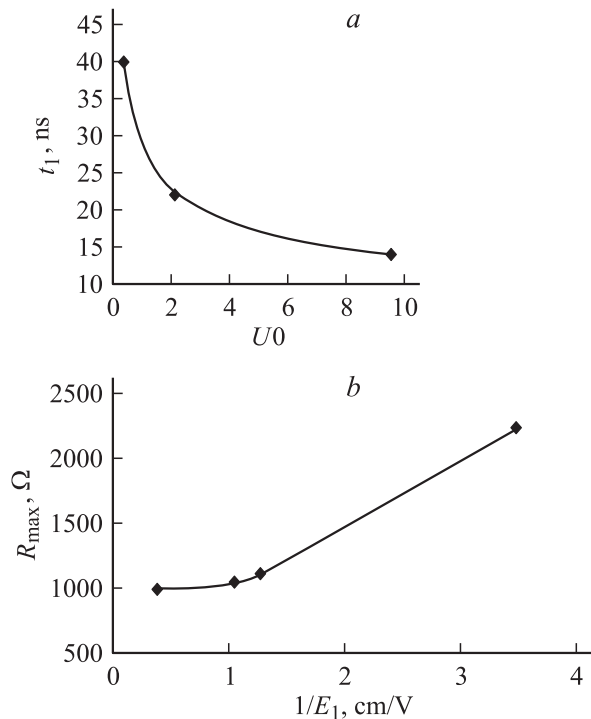
По своей сути, параметр  $U0$  является обобщенной характеристикой эмиссионных свойств МК пластины. Использование этого параметра позволяет объяснить близкие значения  $t_1$  катодов с существенно разными характеристиками. Так, для катодов П-1 и 1890 значение  $U0$  составляет 2.08 и 2.1 соответственно. Как видно (табл. 3), эти катоды имеют близкие значения  $t_1$ .

Таким образом, можно прогнозировать свойства МК катодов, исходя из состава МК пластин, используя полученные данные и параметр  $U0$  (рис. 6). Так, можно оценить, что при увеличении диаметра частиц в МК пластине П-1 до  $D = 50 \mu\text{m}$ ,  $t_1$  составит около 28 ns.

Важным параметром, определяющим свойства катода, является импеданс диода. Желательно иметь возможность оценивать значение импеданса в момент максимума напряжения  $R_{\text{max}}$ , так как именно в этот момент формируется пучок максимальной энергии. Из экспериментальных данных видно (табл. 3), что имеется обратная зависимость  $R_{\text{max}}$  от параметра  $U0$ , однако



**Рис. 5.**  $a$  — зависимость напряженности поля  $E_1$  в микрополости от расстояния  $d$ ,  $b$  — зависимость напряженности поля  $E_1$  в микрополости от безразмерного напряжения  $U0$  при различных значениях  $d$ .



**Рис. 6.**  $a$  — зависимость времени задержки  $t_1$  от безразмерного напряжения  $U0$  ( $d = 47 \text{ mm}$ ),  $b$  — зависимость импеданса  $R_{\text{max}}$  в момент максимума напряжения от напряженности поля  $E_1$  в микрополости ( $d = 47 \text{ mm}$ ).

наиболее очевидна зависимость  $R_{\text{max}}$  от  $1/E_1$  (рис. 6,  $b$ ). Используя эту зависимость, можно оценить, что при увеличении диаметра частиц в МК пластине П-1 до  $D = 50 \mu\text{m}$   $E_1$  составит около 590 kV/cm, а  $R_{\text{max}}$  — около 1300  $\Omega$ , т.е. эмиссионные свойства МК катода снизятся.

Сказанное выше подтверждает, что распределение электрического поля до начала тока чисто емкостное, причем существен как материал керамики, так и количество и размер металлических частиц, что в свою очередь означает, что в процессе участвует большинство частиц МК пластины.

## Заключение

Полученные результаты показывают, что предложенный тип катода обладает рядом интересных для эксплуатации технологических ускорителей характеристик.

Имеет повышенную эмиссионную способность при относительно небольших значениях напряженности электрического поля в вакуумном диоде, что позволяет существенно обострить и увеличить ток (мощность), т.е. уменьшить низкоэнергетическую составляющую спектра пучка без применения специальных устройств и, следовательно, улучшить условия работы фольги для вывода пучка.

Имеется возможность управлять эмиссионными свойствами МК катода посредством изменения состава МК пластины (размера металлических частиц, их плотности

на поверхности и диэлектрической постоянной материала керамики).

В отличие от разряда вдоль поверхности диэлектрика в вакууме [8] для МК катода напряжение  $U_{io}$ , соответствующее началу тока, увеличивается с ростом диэлектрической проницаемости и уменьшением относительной высоты МК пластины  $h$ .

Длительная эксплуатация (более  $10^8$  импульсов) показала, что такой катод не изменяет своих характеристик, и они прекрасно воспроизводятся от импульса к импульсу и от образца к образцу одного и того же типа.

Авторы выражают свою признательность И.В. Бекетову, О.М. Саматову, А.М. Мурзакаеву, В.Р. Хрустову и В.М. Тельновой, участвовавших в изготовлении МК пластин, а также В.И. Кожевникову за помощь в экспериментах.

Работа выполнена при частичной поддержке Уральского научно-образовательного центра „Перспективные материалы“ в рамках российско-американской программы поддержки фундаментальных исследований (CRDF (REC-005)).

## Список литературы

- [1] Kotov Yu.A., Mesyats G.A., Rukin S.N. et al. // Digest of Technical Papers 9<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conf. Albuquerque, 1993. Vol. 1. P. 134–139.
- [2] Kotov Yu.A., Mesyats G.A., Korzhenevskii S.R. et al. // Proc. 10<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conf. Santa Fe (New Mexico), 1995. P. 1231–1234.
- [3] Котов Ю.А., Соковнин С.Ю. // ПТЭ. 1997. № 4. С. 84–86.
- [4] Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е. // ПТЭ. 2000. № 2. С. 112–115.
- [5] Котов Ю.А., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е. Патент РФ. № 2158982.
- [6] Котов Ю.А., Литвинов Е.А., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е., Хрустов В.Р. // ДАН. 2000. Т. 370. № 3. С. 332–335.
- [7] Kotov Yu.A., Sokovnin S.Yu., Balezin M.E. // Proc. 12<sup>th</sup> Symposium on High Current Electronics. Tomsk, 2000. P. 38–42.
- [8] Бугаев С.П., Кремнев В.В., Тереньтьев Ю.И., Шпак В.Г. и др. // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 9. С. 1958–1962.
- [9] Котов Ю.А., Лучинский А.В. // Физика и техника мощных импульсных систем / Под ред. Е.П. Велихова. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 189–210.
- [10] Котов Ю.А., Филатов А.Л., Соковнин С.Ю. и др. // ПТЭ. 1986. № 2. С. 138–141.
- [11] Меляц Г.А. // Эктоны. Ч. 2. Екатеринбург: Наука, 1994. 243 с.