

## Отлипание электронов от молекул кислорода воздуха в интенсивном электрическом поле

© Н.И. Буслеев, В.Л. Бычков, Л.П. Грачев,<sup>¶</sup> И.И. Есаков, А.А. Раваев

Московский радиотехнический институт РАН,  
117519 Москва, Россия

<sup>¶</sup> e-mail: grachev@mrtrian.ru

(Поступило в Редакцию 25 октября 2016 г.)

Описываются результаты экспериментов по электрическому пробую воздуха в квазиоптическом СВЧ пучке с глубоко подкритическим уровнем исходного поля. Пробой инициировался цилиндрическим вибратором со сферически закругленными концами и вибратором с конически заостренным концом. Анализ опытных данных дает основание предположить, что необходимое наличие начальных электронов в пробойной области может обеспечиваться процессом их отлипания от молекул кислорода воздуха, который зависит от величины поля.

DOI: 10.21883/JTF.2017.09.44905.2079

### Введение

В настоящее время рассматриваются различные варианты практического применения инициированных электромагнитным (ЭМ) вибратором газовых электрических разрядов в квазиоптическом СВЧ-пучке с глубоко подкритическим уровнем поля [1–3]. Здесь словосочетание „критический уровень поля“  $E_{cr}$  подразумевает его минимальный пробойный уровень в пространственно-однородной и непрерывной ЭМ волне [4]. Для зажигания разряда в подкритическом поле в СВЧ пучок параллельно вектору электрической составляющей исходной ЭМ волны  $E_0$  может быть помещен линейный цилиндрический ЭМ вибратор [5]. При этом амплитуда индуцированного поля на полюсах вибратора  $E_{pol}$  может на несколько порядков превышать амплитуду исходного поля  $E_0$ . Это превышение реализуется в малой области, прилегающей к полюсным поверхностям вибратора. Для начала развития процесса электрического разряда в этой области поле  $E_{pol}$  должно превышать величину критического поля пробоя  $E_{cr}$ , и в ней должно быть некоторое число начальных свободных электронов  $N_{e0}$ .

На практике при использовании для зажигания разряда СВЧ импульсов с длительностью  $\tau_{pul}$  в десятки доли секунды требование наличия  $N_{e0}$  в пробойной области, как правило, не соблюдается. В этом случае в лабораторных исследованиях одну из полюсных поверхностей инициирующего разряд вибратора можно облудить синхронизированным с передним фронтом СВЧ импульса короткоимпульсным ультрафиолетовым (УФ) излучением, например, от сравнительно удаленного вспомогательного разряда [6]. Это УФ излучение за счет фотоэмиссии электронов с полюсной поверхности вибратора и обеспечивает их начальное наличие в пробойной области. В практических устройствах такая возможность технически может быть неосуществима. В то же время текущий экспериментальный опыт показал, что может реализоваться и другой способ обеспечения

наличия в пробойной области требуемого числа  $N_{e0}$  [7]. В этих опытах один из полюсов вибратора конусно заострялся, и в этом случае пробой реализовывался и без вспомогательного УФ излучения. Объяснением этого явления может явиться процесс отлипания электронов от молекул кислорода в прилегающей к конической поверхности вибратора области воздуха в электрическом поле большой амплитуды.

В настоящей работе описываются результаты экспериментов по электрическому пробую воздуха в импульсном глубоко подкритическом исходном СВЧ поле при  $E_0 \ll E_{cr}$ . Пробой инициируется цилиндрическим ЭМ вибратором или со сферически закругленными концами, или вибратором, один конец которого конически заострен. Эксперименты проводились как при облучении вибраторов УФ излучением, так и без него. Полученные результаты обсуждаются и дают основание предположить, что необходимые для начала процесса развития СВЧ разряда свободные электроны в пробойной области могут появиться в результате их отлипания от отрицательно заряженных молекул кислорода воздуха в интенсивном СВЧ поле.

### Условия экспериментов и их результаты

Эксперименты выполнялись на описанной в работе [8] установке с импульсным СВЧ излучением, имеющим длину волны  $\lambda = 12.3$  см при длительности импульсов  $\tau_{pul} = 0.4$  с. В них, как показано на рис. 1, линейно поляризованная СВЧ волна излучается вертикально вниз в СВЧ безэховую герметичную рабочую камеру. Давление воздуха в ней  $p_c$  можно устанавливать от атмосферного значения до 10 Торг и измерять с точностью  $\pm 1.5$  Торг. В СВЧ волну перпендикулярно ее волновому вектору  $\mathbf{k}$  помещается плоский металлический лист-экран. На нем на пенопластовой подставке на расстоянии  $h = \lambda/4 = 31$  мм от поверхности экрана

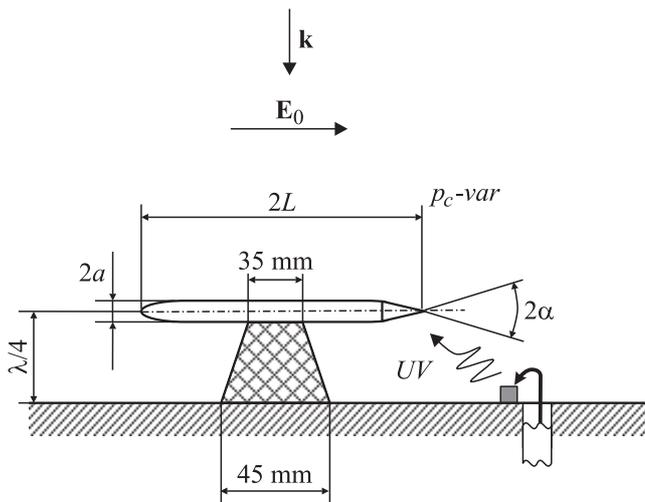


Рис. 1. Схема экспериментов.

в пучности падающей и отраженной ЭМ волн может помещаться цилиндрический алюминиевый вибратор, диаметром  $2a = 5.6 \text{ mm}$ . В опытах использовались два варианта исполнения вибратора. В первом — оба конца вибратора сферически закруглялись, во втором — один его конец конически заострялся под углом  $2\alpha = 20^\circ$ . Длина вибраторов  $2L$  ступенчато уменьшалась от максимального значения  $2L \approx \lambda/2$ .

В опытах, как показано на рис. 1, мог использоваться вспомогательный разрядник — источник УФ излучения. Он обеспечивал зажигание искрового разряда длительностью в сотые доли секунды между внутренней жилой высоковольтного кабеля и поверхностью экрана. Включение этого разрядника синхронизировалось с передним фронтом СВЧ импульса. УФ излучение освещало поверхность одного из сферически закругленных концов вибратора или конически заостренный его конец. При этом для соблюдения неизменности геометрических факторов в пробойной области укорочение вибраторов производилось с противоположного конца.

В экспериментах предварительно была измерена амплитуда исходного поля  $E_0$  при  $h = \lambda/4$ . Для этого в предполагаемом месте расположения „рабочего“ ЭМ вибратора на экран помещалась пенопластовая прямоугольная стойка с размером поперечного сечения  $20 \times 20 \text{ mm}$ . На ее верхнюю поверхность параллельно вектору  $E_0$  помещался короткий цилиндрический алюминиевый вибратор со сферически закругленными концами диаметром  $2a = 5.6 \text{ mm}$  и длиной  $2L = 22.4 \text{ mm}$ , т.е. при отношении  $2L/2a = 4$ . У такого вибратора отношение  $E_{\text{pol max}}/E_0 = 10$  [9]. В опыте определилось максимальное граничное давление воздуха в рабочей камере  $p_c = p_{\text{br}}$ , при котором при использовании вспомогательного разрядника этот вибратор инициировал СВЧ пробой. Измерения дали  $p_{\text{br}} = 25 \text{ Torr}$ . Этому давлению в соответствии с работой [9] отвечает  $E_0 = 180 \text{ V/cm}$ .

В основной экспериментальной серии с двумя видами инициаторов также при каждом значении  $2L$  определялось граничное давление  $p_c = p_{\text{br}}$ . При этом в опытах выяснилось, что в случае зажигания разряда поверхность вибратора существенно нагревается, что неконтролируемо влияет на величину  $p_{\text{br}}$ . В связи с этим после фиксации горения разряда в конкретном СВЧ импульсе при необходимости следующее его включение осуществлялось лишь через временную паузу, не меньшую минуты. В этом случае стабильность измеряемых  $p_{\text{br}}$  выдерживалась.

Первоначально опыты выполнялись с вибратором со сферически закругленными концами. При этом выяснилось, что во всем диапазоне варьирования его длины  $2L$  без включения дополнительного разрядника он не инициировал СВЧ разряд. Инициация разряда осуществлялась только при облучении вибратора УФ излучением. Полученные экспериментально значения  $p_{\text{br}}$  при конкретных величинах  $2L$  в виде треугольников приведены на рис. 2 и соединены аппроксимирующей кривой. Она по характеру зависимости  $p_{\text{br}}(2L)$  повторяет аналогичную экспериментальную зависимость, приведенную в работе [7]. Диапазон варьирования значений длины вибратора  $\Delta 2L$  в таком исполнении был определен по приведенным в этой работе результатам опытов с вибраторами с заостренным концом. Именно в этом диапазоне  $\Delta 2L$  длина последних была резонансной.

Результаты экспериментов с вибратором с заостренным концом также приведены на рис. 2. На нем значения  $p_{\text{br}}$ , полученные с УФ излучением, показаны точками и соединены аппроксимирующей линией. Результаты же, полученные без УФ излучения, обозначены крестиками.

Эти эксперименты выполнялись в следующей последовательности.

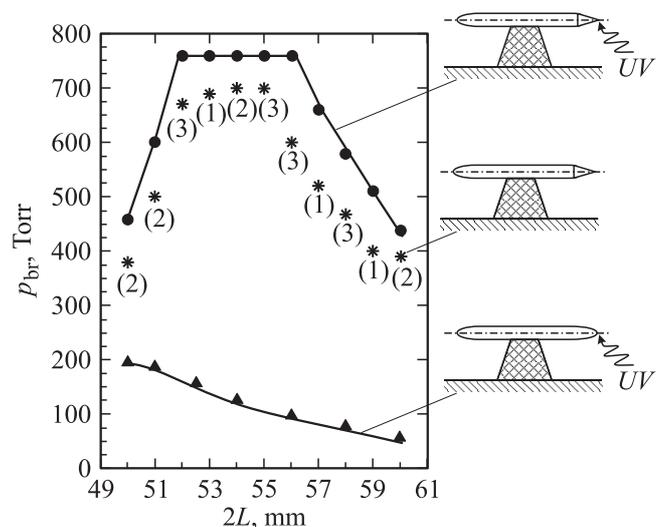


Рис. 2. Экспериментальные данные максимального пробойного давления воздуха при фиксированном уровне СВЧ поля в зависимости от длины вибратора.

Первоначально в ЭМ пучок был помещен вибратор максимальной длины  $2L = 60$  мм. Рабочая камера начинала плавно откачиваться с одновременным включением с частотой 1 Нз СВЧ импульсов и вспомогательного разрядника — источника УФ излучения. В опыте при  $p_c = p_{br} = 438$  Торг с данным вибратором был зафиксирован факт инициации СВЧ пробоя. С этого момента уменьшение  $p_c$  было прекращено, а вспомогательный разрядник отключен. При этом при данном значении  $p_c$  и трехкратном включении СВЧ импульса пробой воздуха не происходил. Давление  $p_c$  начинало ступенчато с шагом 3 Торг уменьшаться, и при каждом его значении производилось трехкратное включение СВЧ импульсов. В опытах с данным вибратором лишь при  $p_c = 390$  Торг во втором последовательном СВЧ импульсе разряд был зафиксирован. На рис. 2 крестиком обозначено это значение  $p_c = p_{br}$ , а рядом в скобках указано, на каком по счету импульсе произошел СВЧ пробой.

Затем длина вибратора уменьшалась на 1 мм, и опытный цикл в указанной последовательности повторялся. И так до минимальной длины вибратора  $2L = 50$  мм.

Из рис. 2 следует, что зависимость  $p_{br}(2L)$  при использовании УФ излучения имеет резонансный регулярный характер. При этом данный вибратор инициирует пробой воздуха и при атмосферном давлении в диапазоне  $2L$  от 52 до 56 мм. Зависимость же  $p_{br}(2L)$  без УФ излучения, хотя и близка к резонансной, существенно ниже „аппроксимированной“ и нерегулярна. В этом случае пробой воздуха при атмосферном давлении вообще не осуществлялся. Кроме того, при конкретных значениях  $2L$  и пороговом давлении  $p_{br}$  инициация пробоя осуществлялась не в каждом из трех СВЧ импульсов.

## Обсуждение

Условие СВЧ пробоя воздуха принято записывать в виде [4]

$$v_i \geq v_a + v_d + v_\tau; 1/s, \quad (1)$$

где  $v_i$  — частота ионизации молекул воздуха электронными ударами,  $v_a$  — частота прилипания разрядных электронов к молекулам воздуха,  $v_d$  — частота их диффузионного ухода из пробойной области и  $v_\tau$  — частота, характеризующая временную ограниченность СВЧ импульса. В СВЧ поле энергия разрядных электронов  $\varepsilon_e$  лежит в узком диапазоне значений, близких к  $\varepsilon_e = 1$  эВ. Это позволяет рассчитывать перечисленные величины оценочными выражениями [8]

$$v_i = v_a(E/E_{cr})^{5.3}; 1/s, \quad (2)$$

$$v_a = 2 \cdot 10^4 p; 1/s, \quad (3)$$

$E$  — амплитуда СВЧ поля;

$$E_{cr} = 42p\sqrt{1 + (\omega/v_c)^2}; V/cm \quad (4)$$

— амплитуда критического поля пробоя,  $\omega$  — круговая частота поля,

$$v_c = 4 \cdot 10^9 p; 1/s \quad (5)$$

— частота столкновений электронов с молекулами воздуха,

$$v_\tau = 30/\tau_{pul}; 1/s. \quad (6)$$

В этих выражениях, как и в последующих, без специальной оговорки, размерность давления — Торг.

В случае реализации условия (1) поле  $E$  в формуле (2) и есть поле пробоя  $E_{br}$ . Отсюда требуемое минимальное превышение пробойного поля над критическим в пространственно-ограниченной пробойной области

$$\xi = E_{br}/E_{cr} = (1 + v_d/v_a)^{1/5.3}. \quad (7)$$

В это выражение на основе оценок, учитывающих рассматриваемые опытные условия, частота  $v_\tau$  не включена.

Частота диффузионного ухода электронов  $v_d$  из пробойной области с  $E \geq E_{cr}$  зависит от ее геометрии и условий на границах. Для некоторых простейших случаев в работе [4] даны формулы для расчета значений  $v_d$ .

В работе [10] приведен порядок расчета коэффициента  $\xi$  для случая пробоя воздуха, инициированного облучаемым УФ излучением металлическим шариком, помещенным в линейно поляризованный СВЧ пучок. В ней учтено, что поле около полюсов шарика, где вектор  $E_0$  перпендикулярен его поверхности, описывается законом

$$E_{pol} = E_0 + 2E_0/(1 + x/a)^3, \quad (8)$$

где коэффициент 2 показывает, во сколько раз амплитуда индуцированного поля на поверхности шарика больше амплитуды исходного поля  $E_0$ ,  $x$  — расстояние от полюсной поверхности шарика, а  $a$  — его радиус. В настоящей работе показано, что величина  $\xi = E_{pol\ max}/E_{cr} \equiv E_{br}/E_{cr}$  зависит от параметра

$$\eta = l_a/a = 0.84/(ap), \quad (9)$$

где с учетом наличия УФ излучения диффузионная длина прилипания электронов  $l_a = \sqrt{D_a/v_a} = 0.84/p$ ; см при коэффициенте амбиполярной диффузии  $D_a = 1.4 \cdot 10^4/p$ ; см<sup>2</sup>/с и размерности  $a$  — см. Расчет в этой работе коэффициента  $\xi$  показал его рост от 1 до 2.5 при увеличении значений параметра  $\eta$  от 0 до 0.3. Таким образом, в реальных ситуациях поле на полюсах шарика, обеспечивающее пробой воздуха  $E_{pol\ max} = E_{br}$ , может существенно превышать  $E_{cr}$ .

В случае цилиндрического вибратора со сферически закругленными концами поле на его полюсах  $E_{pol\ max}$  может в десятки–сотни раз превышать поле  $E_0$ . В то же время расчеты показывают, что при этом закон „спадания“ индуцированного поля при  $x \leq 0.5a$  практически близок закону (8). Следовательно, при использовании УФ подсветки коэффициент  $\xi$  задается, как и для шарика, определенным формулой (9) коэффициентом  $\eta$ .

Теория расчета пробойного поля  $E_{br}$  в случае вибратора с конически заостренным концом в настоящее

время не разработана. В то же время очевидно, что, с одной стороны, в соответствии с законами электродинамики индуцированное поле на его конусной поверхности может в еще большее число раз превышать поле  $E_0$ , особенно при приближении к острию конуса. С другой стороны, при приближении к острию закон спада этого поля будет более резким по сравнению с (8), и влияние диффузионного фактора на процесс пробоя будет более существенным. Следовательно, величина индуцированного поля у конусной поверхности вибратора, обеспечивающая пробой воздуха, может и должна в разы превышать поле  $E_{cr}$ .

Воздух условно принято называть электроотрицательным газом. Это связано с тем, что часть его молекул кислорода  $O_2$  заряжена отрицательно  $O_2^-$ . В атмосферном воздухе за счет фоновых излучений в результате ионизации его молекул возникает некоторое число свободных электронов [4]

$$Q_e = 10(p/760), 1/(cm^3 \cdot s). \quad (10)$$

Эти электроны почти „мгновенно“ прилипают к молекулам кислорода в тройных столкновениях  $e + O_2 + N = O_2 + N$ , где  $N$  — любая молекула, с частотой прилипания

$$\nu_{a1} = (10p)^2, 1/s. \quad (11)$$

Затем включаются рекомбинационные процессы, и в заключение около 30% молекул кислорода воздуха оказываются отрицательно заряженными. Их концентрация

$$n_{O_2^-} \approx 2.4 \cdot 10^{18}(p/760), 1/cm^3. \quad (12)$$

При включении СВЧ поля на эти молекулы начинает действовать эффективная электрическая сила  $F = q_e E / \sqrt{2}$ , где  $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ , К — заряд электрона и на среднем пути до столкновения с другими молекулами  $l_{av} = 5 \cdot 10^3/p$ , см они набирают дополнительную энергию

$$\Delta \varepsilon = E q_e l_{av} / \sqrt{2}, J. \quad (13)$$

Если эта энергия близка к энергии отлипания электрона от молекулы кислорода  $\varepsilon_{det} = 1$  eV, то появляется вероятность его отлипания. Таким образом, при большом уровне СВЧ поля отлипание от  $O_2^-$  электронов и без вспомогательного УФ излучения может обеспечить необходимое их начальное наличие в пробойной области.

Формулы (4) и (13) показывают, что в независимости от  $p$  для обеспечения этого явления поле  $E$  должно быть примерно в 6.7 раз больше  $E_{cr}$ . Однако это значение рассчитано для среднего значения  $l_{av}$ . Реально пути до столкновений молекул  $O_2^-$  с другими молекулами воздуха имеют статистический разброс и, следовательно, даже при меньшем поле часть  $O_2^-$  молекул могут обеспечить требуемую величину энергии  $\varepsilon_{det}$ .

В качестве ориентира для экспериментальных данных проведем некоторые абсолютные оценки введенных величин.

Как уже указывалось, вибратор со сферически закругленными концами при  $2L = (50 - 60)$  мм без УФ подсветки не инициировал СВЧ разряд. Следующие из рис. 2 полученные при УФ подсветке экспериментальные значения  $p_{br} = (200 - 50)$  Torr. При  $2a = 5.6$  мм по (9) они дают значения коэффициента  $\eta = 0.015 - 0.06$ , что соответствует величинам  $\xi = 1.15 - 1.4$ . Следовательно, поле в приполюсных областях вибратора с такими длинами лишь ненамного превышает  $E_{cr}$ . В этом случае говорить о возможном отлипании электронов не приходится. Это и фиксирует эксперимент.

Из рис. 2 следует, что экспериментальные значения  $p_{br}$  для вибратора с конически заостренным концом в этом диапазоне значений  $2L$  при наличии УФ подсветки находятся на порядок выше, чем данные для вибратора со сферически закругленными концами. Это и подтверждает тот факт, что индуцированное поле у заостренного конца вибратора весьма значительно. Однако по опытным значениям  $p_{br}$  для конкретных  $2L$  можно рассчитать только величины  $E_{cr}$ . По ним нельзя оценить значения коэффициентов  $\xi$ . Ясно только, что он имеет масштаб нескольких единиц. Это же подтверждает и факт инициации таким вибратором пробоя воздуха без УФ подсветки. Зафиксированный статистический характер этого явления констатирует, что в пробойной области при реализующихся локальных значениях коэффициента  $\xi = E_{pol \max} / E_{cr}$  факт отлипания электронов от молекул  $O_2^-$  является нерегулярным.

Здесь уместно сделать следующее замечание.

При построении опирающихся на процесс „отлипания“ правил расчета коэффициента  $\xi$  надо учитывать, что в этом случае „убегание“ электронов из пробойной области будет определяться не амбиполярной, а свободной их диффузией. Коэффициент же свободной диффузии  $D_e = 1.6 \cdot 10^6/p$ ;  $cm^2/s$  на два порядка больше коэффициента  $D_a$ . В результате в разрабатываемой теории на порядок возрастет значение коэффициента  $\eta$  и определяемое им обеспечивающее пробой воздуха превышение поля  $E_{pol \max}$  над полем  $E_{cr}$ . В свою очередь, высокий уровень поля и обеспечивает отлипание электронов от молекул  $O_2^-$ .

## Заключение

Таким образом, экспериментально с использованием ЭМ вибратора с конически заостренным концом удалось осуществить электрический пробой воздуха в квазиоптическом СВЧ пучке с глубоко подкритическим уровнем поля. При этом пробой был осуществлен и без облучения ЭМ вибратора УФ излучением. Сравнительно простая геометрия использованного вибратора позволяет развить соответствующую теорию и сравнить расчетные результаты с опытными данными. В реальных устройствах вибратор может иметь и другую геометрию. Например, он может быть более заостренным [7] или выполнен из провода существенно меньшего диаметра и осуществлять пробой воздуха при больших давлениях и меньших уровнях исходного поля.

Выполненные эксперименты дают основание предположить, что в электрических разрядных процессах существенную роль может играть процесс отлипания электронов от молекул кислорода воздуха в интенсивном электрическом поле — и не только СВЧ диапазона. Это может помочь анализировать, например, различные необъяснимые пока процессы в грозовых атмосферных явлениях.

## Список литературы

- [1] *Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V., Vinogradov V.A., Van Wie David M.* // 44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (Reno, Nevada, USA, 2006). AIAA-2006-1212.
- [2] *Esakov I., Grachev L., Khodataev K., Vinogradov V., Van Wie D.* // 46<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, USA, 2008. AIAA-2008-1403.
- [3] *Buchkov D.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V., Van Wie D.M.* // 47<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Orlando, USA, 2009. AIAA-2009-1551.
- [4] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 591 с.
- [5] *Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В.* // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 7. С. 60–67.
- [6] *Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Раваев А.А., Северинов Л.Г., Яковлев А.Ю.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 4. С. 28–33.
- [7] *Esakov I., Grachev L., Khodataev K., Van Wie D.* // 49<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting. Orlando, Florida, USA, 2012. AIAA-2011-1151.
- [8] *Грачев Л.П., Есаков И.И., Александров К.В., Раваев А.А., Северинов Л.Г., Ходатаев К.В.* Газовый электрический разряд в квазиоптическом СВЧ пучке. М.: АО МРТИ РАН, 2015. 187 с.
- [9] *Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 12. С. 26–30.
- [10] *Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В., Цыленков В.В.* // Физика плазмы. 1992. Т. 18, Вып. 3. С. 411–413.