

Параметрическая генерация свистовых волн при взаимодействии высокочастотных волновых пучков с магнитоактивной плазмой

М. Е. Гушин¹⁾, С. В. Коробков, А. В. Костров, А. В. Стриковский

Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 23 сентября 2008 г.

После переработки 23 октября 2008 г.

Экспериментально исследована параметрическая генерация низкочастотных свистовых волн пучком накачки, состоящим из высокочастотных свистовых волн с близкими частотами. Изучены электромагнитные поля, возбуждаемые биениями двух высокочастотных волн, попутных или встречных, а также амплитудно-модулированной накачкой. Показано, что нелинейные токи на частоте биений (модуляции) возникают из-за поперечной пондеромоторной силы, которая обусловлена конечной шириной высокочастотного пучка. При этом нелинейные дрейфовые токи охватывают пучок накачки по азимуту и могут излучать низкочастотные свистовые волны в окружающую плазму.

PACS: 52.25.Xz, 52.35.Hg, 52.72.+v

При проведении активных экспериментов в околоземной плазме [1–3] одной из важнейших задач является генерация низкочастотных (свистовых и альфвеновских) волн. При этом эффективность компактных спутниковых антенных систем невелика вследствие больших длин волн излучения, а при возбуждении с поверхности Земли значительная часть мощности теряется при распространении излучения на трассе “атмосфера-ионосфера-магнитосфера”. Один из путей повышения эффективности генерации низкочастотных волн состоит в создании протяженных излучающих токовых систем непосредственно в околоземной плазме. Для этих целей ранее предлагалось использовать модулированные пучки заряженных частиц, инжектируемые с борта космических аппаратов [4], либо нелинейные эффекты в поле интенсивных волн с относительно высокими частотами, возбуждаемых спутниковыми и наземными передатчиками [5, 6].

Настоящая работа посвящена параметрической генерации низкочастотных (НЧ) свистовых волн высокочастотной (ВЧ) накачкой свистового диапазона: $\sqrt{f_{ci}f_{ce}} < f < f_{ce} \ll f_{pe}$, где f – частота излучения, f_{ci} и f_{ce} – циклотронные частоты ионов и электронов, соответственно, f_{pe} – электронная плазменная частота. Реализуется идея параметрической антенны [7, 8], которая заключается в следующем. В плазме возбуждается интенсивный пучок накачки, состоящий из двух ВЧ волн близких частот или, в общем случае, модулированный сигналом низкой частоты. Из-за нелинейности в плазме возникают токи

на частоте биений (модуляции) накачки, формирующие “бестелесную антенну”, которая, в свою очередь, излучает НЧ волны. В работе изучены две схемы генерации НЧ волн: 1) амплитудно-модулированной ВЧ накачкой и 2) биениями двух ВЧ волн; во втором случае генерация НЧ волн исследовалась в режимах попутного и встречного распространения волн накачки. Период биений (модуляции) накачки выбирался существенно меньшим характерных времен нагрева электронов и ионной динамики, и единственной нелинейностью, приводившей к генерации НЧ волн, являлась нелинейность, обусловленная действием усредненной пондеромоторной силы на электроны.

Эксперименты выполнялись на большом плазменном стенде “Крот”. Столб замагниченной плазмы длиной около 4 м и диаметром 1.5 м формировался импульсным ВЧ индукционным разрядом в аргоне при давлении $p = 7 \cdot 10^{-4}$ торр; величина внешнего магнитного поля изменялась в пределах $B_0 = 50 \div 150$ Гс. Исследования проводились в распадающейся плазме с плотностью $n_e = 10^{10} \div 10^{12}$ см⁻³ при температуре электронов $T_e \sim 1$ эВ. Для измерения параметров плазмы применялись двойные электрические зонды и зонды с СВЧ резонатором на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии [9]. Для регистрации электромагнитных полей использовались экранированные рамочные антенны диаметром 1 ÷ 2 см, изолированные от плазмы тонким слоем диэлектрика. При измерении НЧ полей приемный тракт включал фильтры, ослаблявшие сигнал накачки на уровне не менее 75 дБ.

Волны накачки ($f = 60 \div 90$ МГц) возбуждались рамочными антеннами диаметром $d = 1.6 \div 7$ см,

¹⁾e-mail: mguschin@appl.sci-nnov.ru

установленными вблизи оси плазменного столба ($r = 0$ см). Уровень мощности, подводимой к антеннам, составлял $P = 20 \div 250$ Вт. С помощью дополнительного источника нагрева в плазме формировался вытянутый вдоль внешнего магнитного поля канал (дакт) с пониженной плотностью, в который ВЧ волны захватывались в волноводном режиме [10]. Благодаря наличию дакта, волны накачки распространялись вдоль оси плазменного столба в форме узких ($\Delta r < 10$ см) слабо расходящихся волновых пучков с продольным масштабом $L \sim 100$ см. Длина волны накачки, в зависимости от плотности плазмы и величины внешнего магнитного поля, составляла $\lambda_z = 5 \div 10$ см.

На рис.1 приводятся типичные осциллограммы сигналов, принимаемых из плазмы при возбуждении

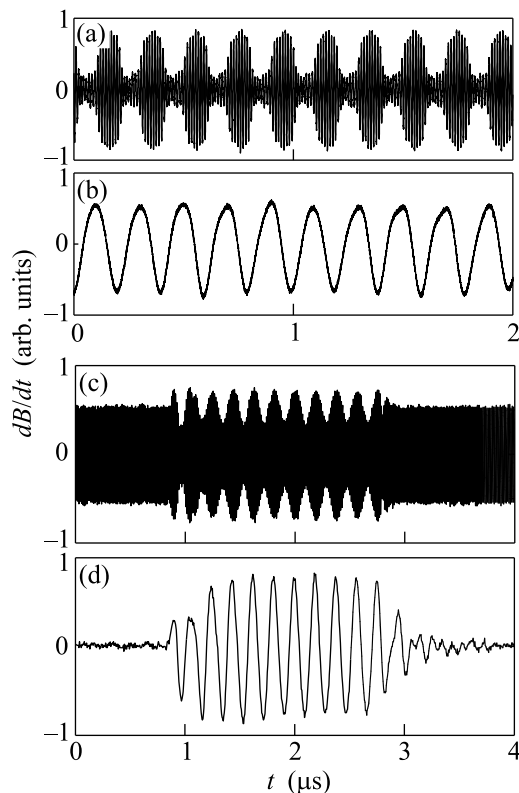


Рис.1. (а) Осциллограмма амплитудно-модулированной волны накачки ($f = 80$ МГц, частота модуляции $f_m = 5.5$ МГц); (б) НЧ сигнал, возбуждаемый в плазме на частоте модуляции f_m ; (в) осциллограмма ВЧ сигнала при возбуждении бигармонической накачки: короткий импульс ($\tau_{p2} = 2$ мкс) на частоте $f_2 = 87.6$ МГц излучается одновременно с длинным импульсом ($\tau_{p1} = 120$ мкс) с частотой $f_1 = 82.3$ МГц; (д) НЧ сигнал на частоте биений $\Delta f = f_2 - f_1 = 5.3$ МГц

амплитудно-модулированной накачки (частота модуляции $f_m = 5.5$ МГц) и бигармонической накачки (от-

стройка частот ВЧ волн $\Delta f = f_2 - f_1 = 5.3$ МГц). В обоих случаях наблюдались НЧ сигналы на частоте биений (модуляции) ВЧ поля. Многочисленные контрольные эксперименты и результаты калибровки измерительных цепей однозначно указывают на то, что генерация НЧ сигналов – плазменный эффект. Характерные значения амплитуды НЧ магнитного поля составляли $\sim 10^{-5}$ Гс при амплитуде магнитного поля ВЧ волн $\sim 5 \cdot 10^{-2}$ Гс.

Как показали эксперименты, поперечный масштаб возбуждаемых НЧ полей значительно превышал ширину пучка накачки. На рис.2 представлены ре-

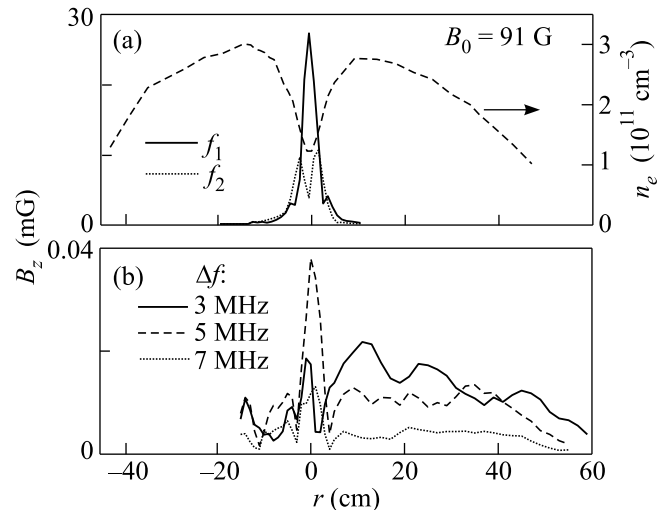


Рис.2. (а) Поперечные распределения амплитуды (B_z компонента) волн накачки с частотами $f_1 = 80.8$ МГц и $f_2 = 86.3$ МГц и поперечное распределение концентрации плазмы с дактом пониженной плотности на расстоянии $z \simeq 50$ см от излучающих антенн; (б) поперечные распределения амплитуды (B_z компонента) НЧ волн, возбуждаемых при различных значениях отстройки частот в бигармоническом поле накачки ($\Delta f = f_2 - f_1 = 3, 5$ и 7 МГц), в том же сечении

зультаты экспериментов с бигармонической накачкой, состоящей из двух попутных ВЧ волн. Хотя обе ВЧ волны были локализованы в дакте плотности (рис.2а), возбуждаемые ими НЧ поля регистрировались по всему сечению плазменного столба (рис.2б). Интерферометрические измерения позволяют однозначно идентифицировать НЧ поля как косые свистовые волны с близкими значениями продольной и поперечной фазовой скорости, $V_{||} \sim V_{\perp} \sim 10^8 \div 10^9$ см/с (рис.3). Продольная длина волны НЧ излучения, в зависимости от параметров плазмы, составляла $\lambda_z \sim 50 \div 100$ см.

Эксперименты показали, что в случае амплитудно-модулированной накачки и при бигармонической

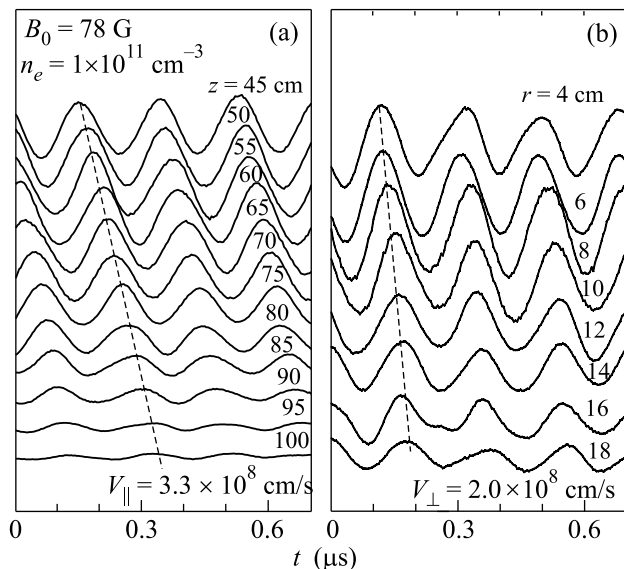


Рис.3. Осциллограммы НЧ сигналов, возбуждаемых бигармонической накачкой на биениях попутных ВЧ волн ($f_1 = 80.5$ МГц, $f_2 = 85.8$ МГц), полученные при различных аксиальных (а) и радиальных (б) позициях измерительной антенны; результаты измерений продольной и поперечной (относительно направления внешнего магнитного поля) фазовой скорости НЧ волн

накачке, состоящей из попутных волн, генерация НЧ волн происходила в режиме, близком к резонансному, в котором продольная составляющая их фазовой скорости связана со скоростью волны модуляции или групповой скоростью ВЧ излучения: $V_{\parallel} \simeq v_{gr}$. В частности, при специальном подборе значений плотности плазмы и величины внешнего магнитного поля наблюдался почти точный синхронизм накачки с возбуждаемыми НЧ волнами (рис.4). В то же время, продольный масштаб пучка накачки в условиях эксперимента составлял величину, сравнимую как с пространственным периодом модуляции ВЧ поля, $a = v_{gr}/\Delta f$ или $a = v_{gr}/f_m$, так и с длинами возбуждаемых НЧ волн. В результате продольные волновые числа и угловой спектр НЧ волн определялись не только периодом биений (модуляции) накачки, $a \gtrsim 30$ см, но и полным размером области, занятой ВЧ полем, $L \sim 100$ см. Как следствие, продольная фазовая скорость НЧ волн, регистрировавшихся в эксперименте, не всегда совпадала с групповой скоростью накачки и могла отличаться от нее в $1.5 \div 2$ раза.

Распределение НЧ полей, возбуждаемых биениями встречных ВЧ волн, существенно отличалось от крупномасштабной структуры волн, генерируемых попутными ВЧ волнами и амплитудно-модулированной накачкой (рис.5). В этом случае скорость вол-

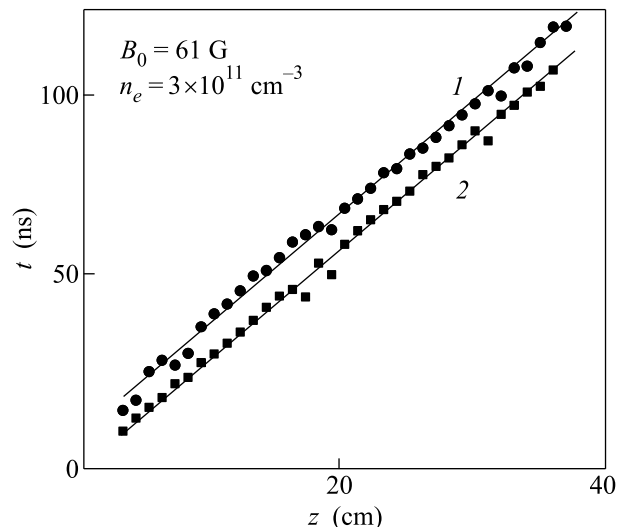


Рис.4. Результаты измерений (1) фазовой задержки возбуждаемых НЧ волн и (2) групповой задержки амплитудно-модулированной волны накачки в зависимости от расстояния до излучающей антенны. Несущая частота накачки $f = 80$ МГц, частота модуляции $f_m = 5$ МГц

ны биений, распространявшейся попутно с ВЧ волной более высокой частоты, составляла $v_b = \Delta f \lambda_z / 2 \sim \sim 10^7$ см/с и была на порядок меньше фазовой скорости НЧ волн ($V_{\parallel} > 10^8$ см/с). Таким образом, на длине пучка накачки укладывалось много периодов биений ВЧ поля, но резонансный режим генерации НЧ волн не мог быть реализован. Регистрируемые на частоте Δf поля являлись суперпозицией вынужденных колебаний с пространственным периодом биений ($a \simeq \lambda_z / 2 \sim 2.5 \div 5$ см) и свистовых волн с длинами $\lambda_z \gg a$. Интерференция этих полей приводила к мелкомасштабной модуляции НЧ поля вдоль оси z с периодом, близким к периоду биений a , и почти не зависящим от Δf (рис.5с). Измерения показали, что НЧ волны возбуждались в направлении распространения “медленной” волны биений, однако их амплитуда быстро спадала к периферии пучка накачки. Хотя в области ВЧ пучка амплитуда возбуждаемых НЧ полей была сравнима со значениями, полученными при бигармонической накачке из попутных волн, излучение свистовых волн в окружающую плазму практически не наблюдалось.

Обсудим механизм нелинейности, приводящей к возбуждению сигналов на частоте биений (модуляции) накачки. Генерация НЧ волн обусловлена действием усредненной пондеромоторной силы на электроны, что подтверждается беспороговой зависимостью амплитуды НЧ полей от амплитуды накачки, которая близка к квадратичному закону. В то же время, то-

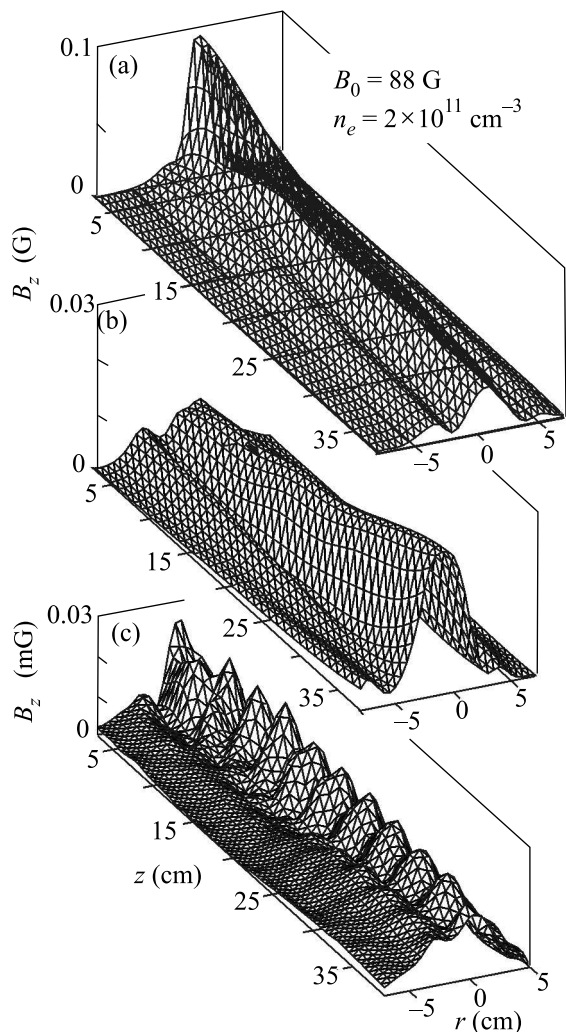


Рис.5. Результаты экспериментов со встречными волнами накачки: (а) распределение амплитуды ВЧ волны (B_z компонента) на частоте $f_1 = 82.3$ МГц, излучаемой рамочной антенной из точки $z = 0$ см, $r = 0$ см; (б) распределение амплитуды ВЧ волны (B_z компонента) на частоте $f_2 = 88.8$ МГц, излучаемой рамочной антенной из точки $z = 86.5$ см, $r = 0$ см; (в) распределение амплитуды НЧ полей (B_z компонента) на частоте биений $\Delta f = 6.5$ МГц

ки, возбуждавшиеся в плазме на частоте биений (модуляции), имели преимущественно вихревой характер и не сопровождалась заметными возмущениями концентрации. Прецизионные локальные измерения, выполненные зондом с СВЧ резонатором в области пучка накачки, не выявили НЧ колебаний плотности плазмы, в то время как НЧ возмущения внешнего магнитного поля уверенно регистрировались. В частности, в области, занятой полем накачки, наблюдалась значительная аксиальная (B_z) компонента НЧ магнитного поля (рис.2б). Таким образом, в плазме

возбуждались соленоидальные нелинейные токи, протекавшие поперек внешнего магнитного поля и охватывавшие пучок накачки по азимуту.

Полученные результаты указывают на то, что для генерации соленоидальных токов принципиальное значение имеет конечная ширина пучка накачки. При этом поперечная неоднородность амплитуды ВЧ пучка вызывает азимутальный дрейф электронов в поле поперечной (радиальной) пондеромоторной силы, скрещенной с внешним (аксиальным) магнитным полем. Соответствующая система дрейфовых токов, изменяющихся с частотой биений (модуляции) накачки, является протяженным источником НЧ волн.

Плотность нелинейного азимутального тока электронов с массой m и зарядом $-e$, формируемого под действием поперечной пондеромоторной силы $\mathbf{F}_\perp = -m\nabla_\perp\Phi$, можно оценить как

$$\mathbf{j} = -en_e\mathbf{v}_d \simeq -mcn_e \frac{[\nabla_\perp\Phi, \mathbf{B}_0]}{B_0^2}, \quad (1)$$

где c – скорость света. Если пондеромоторный потенциал Φ определяется поперечной компонентой ВЧ электрического поля накачки \mathbf{E}_{pump} , то он имеет следующий вид [11]:

$$\Phi = -\frac{e^2|\mathbf{E}_{\text{pump}}|^2}{8\pi^2m^2f(f_{ce} - f)}. \quad (2)$$

Поскольку потенциал (2) соответствует “втягиванию” электронов в область сильного ВЧ поля, возбуждаемый под действием пондеромоторной силы азимутальный ток (1) вызывает парамагнитный эффект – усиление внешнего магнитного поля в пучке накачки. Используя показатель преломления квазипродольных свистовых волн

$$n^2 \simeq \frac{f_{pe}^2}{f(f_{ce} - f)} \sim \frac{|\mathbf{B}_{\text{pump}}|^2}{|\mathbf{E}_{\text{pump}}|^2}, \quad (3)$$

из (1), (2) и закона Ампера можно оценить квазистационарное или НЧ (при модуляции накачки) возмущение магнитного поля:

$$\Delta B_z \sim \frac{|\mathbf{B}_{\text{pump}}|^2}{2B_0}, \quad (4)$$

где $|\mathbf{B}_{\text{pump}}|$ – амплитуда ВЧ магнитного поля в пучке накачки. Заметим, что хотя поперечная неоднородность амплитуды накачки не фигурирует в (4) в явном виде, она принципиальна для формирования азимутального тока и генерации возмущения магнитного поля. При $|\mathbf{B}_{\text{pump}}| \sim 5 \cdot 10^{-2}$ Гс оценки по формуле (4) дают, для внешнего магнитного поля $B_0 \sim 100$ Гс, амплитуду НЧ вариаций $\Delta B_z \sim 10^{-5}$ Гс, согласующуюся с экспериментальными результатами.

Парамагнитный эффект подтверждается измерениями, выполненными вблизи оси пучка накачки: колебания аксиальной компоненты НЧ магнитного поля и огибающей ВЧ поля происходят синфазно.

Результаты показывают, что генерация свистовых волн более эффективна в режиме, близком к резонансному, в котором волна биений (модуляции) накачки синхронна с возбуждаемой НЧ волной. Например, в случае бигармонической накачки такой режим наблюдался при попутном распространении ВЧ волн и не реализовался при их встречном распространении. Недостатком постановки эксперимента являлся малый продольный масштаб ВЧ пучка L , который при возбуждении амплитудно-модулированной накачки и бигармонической накачки из попутных волн был сравним с пространственным периодом биений (модуляции) ВЧ поля. Очевидно, что увеличение длины пучка L до значений, существенно превышающих длину волны биений (модуляции), и, соответственно, продольную длину волны НЧ излучения, позволило бы исследовать резонансный режим генерации более детально.

Стоит подчеркнуть, что взаимодействие пучка накачки с плазмой вызывало, в первую очередь, не модуляцию плотности, а генерацию вихревых электронных токов и магнитных полей и, соответственно, излучение НЧ волн электромагнитного типа, распространяющихся под относительно малыми углами к направлению внешнего магнитного поля. Этот результат отличается от результатов традиционного подхода, в рамках которого нелинейное взаимодействие свистовых волн с плазмой сопровождается модуляцией электронной плотности и возбуждением квазиэлектростатических волн [12].

Таким образом, в работе показано, что модулированное по интенсивности ВЧ излучение может быть использовано для создания в замагниченной плазме протяженных токовых структур, возбуждающих НЧ свистовые волны. Хотя лабораторные эксперимен-

ты были выполнены в свистовом диапазоне частот, аналогичная схема может использоваться в магнитосферных экспериментах для генерации НЧ волн других типов, например – альфвеновских, прямое возбуждение которых спутниковыми антеннами малоэффективно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 07-02-01023а) и Федерального агентства по науке и инновациям (грант # НШ5180.2008.2). Авторы выражают благодарность С.Э. Приверу и А.М. Штанюку за разработку и изготовление радиотехнической аппаратуры, использованной в экспериментах.

1. A. G. Demekhov, V. Y. Trakhtengerts, M. M. Mogilevsky, and L. M. Zelenyi, *Adv. Sp. Res.* **32**, 355 (2003).
2. U. S. Inan, T. F. Bell, J. Bortnik, and J. M. Albert, *J. Geophys. Res.* **108**, SMP6 (2003).
3. V. S. Sonwalkar, D. L. Carpenter, T. F. Bell et al., *J. Geophys. Res.* **109**, A11212 (2004).
4. А. В. Костров, К. Крафт, Ж. Матьесан и др., *Письма в ЖЭТФ* **67**, 378 (1998).
5. M. M. Shoucri, G. J. Morales, and J. E. Maggs, *Phys. Fluids* **25**, 1824 (1982).
6. M. S. Sodha, L. Bhasin, and V. K. Tripathi, *Phys. Plasmas* **15**, 042901 (2008).
7. Л. К. Зарембо, *УФН* **128**, 713 (1979).
8. Г. М. Батанов, А. Е. Петров, К. А. Сарксян, Н. Н. Скворцова, *Физика плазмы* **17**, 1026 (1991).
9. R. L. Stenzel, *Rev. Sci. Instrum.* **47**, 603 (1976).
10. Т. М. Заборонкова, А. В. Костров, А. В. Кудрин и др., *ЖЭТФ* **101**, 1151 (1992).
11. А. Г. Литвак, в сб. *Вопросы теории плазмы*, под редакцией М. А. Леонтовича, вып. 10, М.: Атомиздат, 1980.
12. V. Y. Trakhtengerts and M. Hayakawa, *J. Geophys. Res.* **98**, 19205 (1993).