Письма в ЖЭТФ, том 116, вып. 1, с. 46 – 53 © 2022 г. 10 июля

Особенности турбулентности, возбуждаемой импульсной высокочастотной накачкой в замагниченной плазме

И. Ю. Зудин[1], *М. Е. Гущин, А. В. Стриковский, С. В. Коробков, И. А. Петрова, А. Н. Катков, В. В. Кочедыков*

Институт прикладной физики РАН, 603950 Н. Новгород, Россия

Поступила в редакцию 31 марта 2022 г.
После переработки 22 мая 2022 г.
Принята к публикации 24 мая 2022 г.

На крупномасштабном стенде "Крот" обнаружена и исследована турбулентность замагниченной плазмы, развивающаяся при ее модификации мощным высокочастотным импульсом, подводимым к рамочной антенне. Турбулентность проявляется в возбуждении пульсаций электронной концентрации и магнитного поля, эффектах глубокой самомодуляции волны накачки и модуляции пробных волн, проходящих через модифицированную область плазмы. Пространственно-временные характеристики турбулентности определены с использованием методики коррелированных измерений концентрации плазмы парой миниатюрных зондов с СВЧ-резонаторами и магнитным зондом. Установлено, что турбулентность возбуждается только в области прозрачности плотной замагниченной плазмы для электромагнитного излучения: турбулентные возмущения концентрации и магнитного поля существуют при накачке с частотами, меньшими электронной циклотронной частоты, и отсутствуют при частотах накачки, превышающих электронную циклотронную частоту.

DOI: 10.31857/S1234567822130079, EDN: ixdbwp

Турбулентные явления, развивающиеся в плазме в интенсивных высокочастотных (ВЧ) полях, исследуются уже более 60 лет в связи с необходимостью решения задач нагрева плазмы в установках УТС и объяснения особенностей распространения мощных радиоволн в околоземном космическом пространстве [1]. В частности, большой интерес представляют эффекты генерации искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) излучением наземных и спутниковых радиопередатчиков [2–5]. ИИТ проявляется в возбуждении разномасштабных возмущений параметров плазмы и генерации интенсивных электромагнитных шумов. Механизмы генерации ИИТ и ее свойства до конца не ясны, как в силу изменчивости внешних параметров и разнообразия начальных условий, так и по причине ограниченности экспериментальных данных, получаемых либо дистанционно (например, методами радиопросвечивания [6] и рассеяния радиоволн [7]), либо в редких спутниковых [8] или ракетных [9] измерениях.

Эффективным подходом к изучению явлений в космической плазме считается их моделирование на лабораторных установках, основанное на преобразованиях подобия [10]. Главными достоинствами лабораторного моделирования ИИТ являются, во-первых, возможность многократного воспроизведения эффектов с целенаправленным варьированием условий их протекания при контролируемых внешних условиях, во-вторых – доступность прямых (*in-situ*) измерений параметров турбулентности непосредственно в области ее генерации с использованием широкого арсенала лабораторных средств диагностики. Примеры лабораторного моделирования турбулентности замагниченной плазмы в интенсивных ВЧ полях можно найти в работах [11–13]. В работе [14] была описана турбулентность, возбуждаемая ВЧ импульсом в лабораторной плазме, которая напоминает наблюдаемую в активных ионосферных экспериментах. В настоящей статье представлены результаты детальных экспериментальных исследований свойств обнаруженной турбулентности.

Эксперименты выполнялись на крупномасштабном плазменном стенде "Крот" (рис. 1). Замагниченная плазма создавалась импульсным индукционным ВЧ разрядом (5 МГц, $\tau = 1$ мс) в аргоне при давлении $p = 3 \cdot 10^{-4}$ Торр, и распадалась с характерным временем порядка нескольких миллисекунд. Индукция внешнего магнитного поля составляла $B_0 = 45 \div 180$ Гс. Длина плазменного столба 4 м, диаметр 1 м. Максимальная концентрация плазмы в момент разряда $N_e \simeq 10^{12}$ см$^{-3}$, невозмущенные значения температуры электронов и ионов соответственно $T_e = 0.5 \div 2$ эВ, $T_i \leq 0.5$ эВ. Стенд "Крот" работал в импульсно-периодическом режиме, разряд зажигал-

[1]e-mail: zudiniy@ipfran.ru

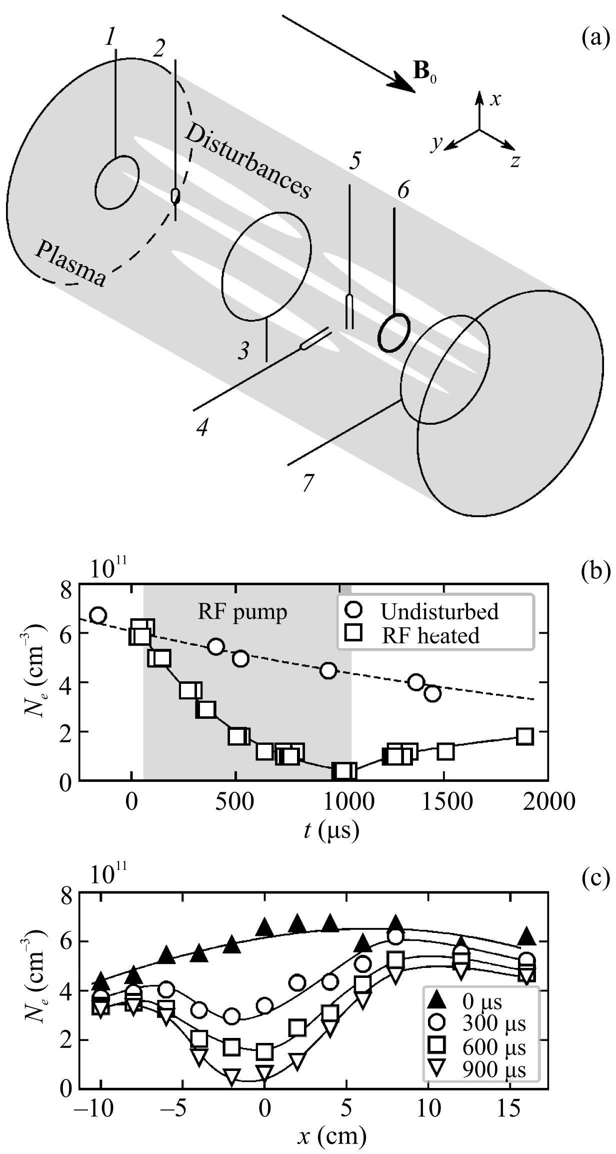

Рис. 1. (a) – Схема экспериментальной установки; цифрами обозначены: *1* – приемная рамочная антенна (0–200 МГц); *2* – зонд Ленгмюра; *3* – антенна накачки (158 МГц, 25–300 Вт); *4*, *5* – зонды с СВЧ резонаторами; *6* – магнитный зонд; *7* – антенна, излучающая пробную волну. (b) – Зависимость концентрации плазмы от времени в режиме невозмущенного распада и при включении импульса ВЧ накачки на оси плазменного столба $(x, y = 0)$ на расстоянии $z = 7$ см от антенны накачки; (c) – поперечные профили концентрации плазмы в различные моменты времени относительно начала импульса накачки в том же сечении. Индукция внешнего магнитного поля $B_0 = 135$ Гс, мощность накачки $P = 50$ Вт

ся один раз в 20 с. Эксперименты проводились в распадающейся плазме, после выключения ВЧ генераторов, когда ее концентрация уменьшалась до значений $N_e = (3 - 6) \cdot 10^{11}$ см$^{-3}$. Электронная плазменная частота в эксперименте в невозмущенных условиях составляла $f_{pe} \sim 6$ ГГц, электронная циклотронная частота $f_{ce} = 0.13 \div 0.5$ ГГц; их отношение $f_{pe}/f_{ce} \simeq 10 \div 40$ качественно соответствовало условиям в области максимума F-слоя среднеширотной ионосферы $(f_{pe}/f_{ce} \simeq 2 \div 8)$. Частота кулоновских столкновений электронов $\nu_{ei} \simeq 3 \cdot 10^6$ с$^{-1}$ превосходила частоту их столкновений с нейтральными атомами $\nu_{en} \simeq 6 \cdot 10^5$ с$^{-1}$. Длина свободного пробега сильно замагниченных $(\nu_{ei}/2\pi f_{ce} \leq 4 \cdot 10^{-3})$ электронов при типичных условиях составляла $\lambda_{ei} \simeq 35$ см и значительно превышала их гирорадиус, $\rho_e = 0.3 \div 1$ мм. Ионы в эксперименте можно считать слабо замагниченными: длина их свободного пробега, $\lambda_{in} \simeq 10$ см, составляла величину порядка ионного гирорадиуса, $\rho_i = 5 \div 15$ см.

Импульс ВЧ накачки длительностью $\tau_{\mathrm{pump}} = 1$ мс с частотой $f_{\mathrm{pump}} = 158$ МГц подавался на круговую рамочную антенну диаметром $D = 70$ мм, плоскость которой была ориентирована перпендикулярно магнитному полю. Центр антенны принят в настоящей работе за начало декартовой системы координат, ось z которой направлена вдоль внешнего магнитного поля, ось y – горизонтально, а ось x – вертикально (см. рис. 1a). В качестве источника ВЧ накачки использовался усилитель мощности с несколькими транзисторными каскадами и оконечным ламповым каскадом. Тракт антенны накачки включал каскад фильтров, подавлявших внеполосовые спектральные составляющие, согласующий шлейф и ферритовый вентиль, защищавший выходные цепи усилителя от отраженной волны. Уровень ВЧ мощности, подводимой к антенне (с учетом потерь на всех элементах тракта), мог контролируемо изменяться в диапазоне $P = 25 \div 300$ Вт. В зависимости от величины B_0, сигнал накачки соответствовал либо свистовому диапазону частот $(f_{\mathrm{pump}} < f_{ce} \ll f_{pe})$, либо полосе непрозрачности плазмы для электромагнитного излучения $(f_{ce} < f_{\mathrm{pump}} \ll f_{pe})$. В эксперименте был реализован слабо столкновительный режим взаимодействия ВЧ поля с плазмой: $\nu_{ei}/2\pi f_{\mathrm{pump}} \leq 3 \cdot 10^{-2}$.

Измерения концентрации плазмы, включая фоновые значения и обусловленные турбулентностью нестационарные возмущения, осуществлялись парой зондов с СВЧ-резонаторами [15] с резонансными частотами $f_0 = 8.304$ и 7.595 ГГц, перемещавшихся по двум координатам (x, y) в сечениях $z = 3$ см и $z = 7$ см (см. рис. 1a). Процедура обработки зондовых сигналов, предложенная в [16], позволяет восстановить ход изменения концентрации вместе с ее возмущениями за один "выстрел" экспериментальной установки для известных параметров СВЧ зонда. Применение зондов с СВЧ резонаторами позволяет, во-первых, исходя из принципа их работы, изолировать возмущения концентрации плазмы от возмущений других параметров, в первую очередь – электронной температуры T_e и внешнего магнитного поля B_0, во-вторых – уверенно регистрировать вариации $\delta N_e(t)$ с относительным уровнем порядка и менее 1 % от среднего значения. Пара СВЧ зондов, обеспечивающая корреляционный анализ возмущений концентрации в различных точках пространства, использовалась впервые.

Для регистрации низкочастотных флуктуаций магнитного поля применялся шестивитковый магнитный зонд диаметром 20 мм в электростатическом экране, который был покрыт слоем диэлектрика для предупреждения возможных нелинейных эффектов на слое пространственного заряда у его поверхности [17]. Пробные волны с частотой $f_{\rm test} \simeq 49$ МГц, в условиях эксперимента всегда соответствовавшей свистовому диапазону ($f_{\rm test} < f_{ce}$), излучались и принимались одновитковыми рамочными антеннами диаметрами 20, 30 и 70 мм, устанавливавшимися как с одной стороны от антенны накачки, так и по разные стороны от нее. Уровень мощности, подводимой к антенне для излучения пробной волны, не превышал 20 мВт. Температура электронов измерялась одиночным зондом Ленгмюра.

Эксперименты показали, что воздействие импульса накачки приводит к нагреву электронов и, в результате термодиффузионного перераспределения плазмы, к образованию неоднородности – вытянутого вдоль магнитного поля дакта пониженной электронной концентрации [14]. Динамика перераспределения плазмы при воздействии импульса накачки мощностью 50 Вт показана на рис. 1b, c. Слегка несимметричное распределение концентрации N_e по поперечной координате относительно оси $x = 0$ обусловлено конфигурацией плазмосоздающей системы и не оказывает существенного влияния на получаемые результаты. При используемых уровнях мощности концентрация плазмы в прогреваемой магнитной силовой трубке за время воздействия ВЧ импульса понижается более чем на порядок относительно фонового значения. Именно в дакте развивается турбулентность, являющаяся предметом настоящей работы. Эта турбулентность проявляется в низкочастотных пульсациях электронной концентрации и магнитного поля в разогретой области плазмы, самомодуляции импульса накачки и модуляции пробных волн, проходящих через модифицированную область.

Динамику развития дакта электронной концентрации и турбулентности в нем хорошо иллюстрируют формы огибающей сигнала накачки, принимаемого в плазме (рис. 2). Плавное нарастание амплитуды ВЧ поля, занимающее $100 \div 150$ мкс от начала импульса, соответствует прогреву плазмы и установлению волноводного режима распространения волны накачки в начинающем формироваться дакте (см. рис. 1c). Спустя некоторое время, зависящее от уровня ВЧ мощности, возникает самомодуляция накачки, которая обусловлена турбулизацией плазмы в дакте. Турбулентные возмущения развиваются в достаточно хорошо прогретой ($T_e > 3$ эВ) плазме с концентрацией электронов $N_e < 10^{11}$ см$^{-3}$. Чем выше мощность накачки, тем быстрее вытесняется плазма из прогретой силовой трубки и, соответственно, тем раньше развивается турбулентность. Модуляция амплитуды достаточно глубокая (до 100 %), нерегулярная во времени, и не воспроизводится от одного "выстрела" установки к другому, что согласуется с представлениями о возмущениях плазмы как о турбулентности.

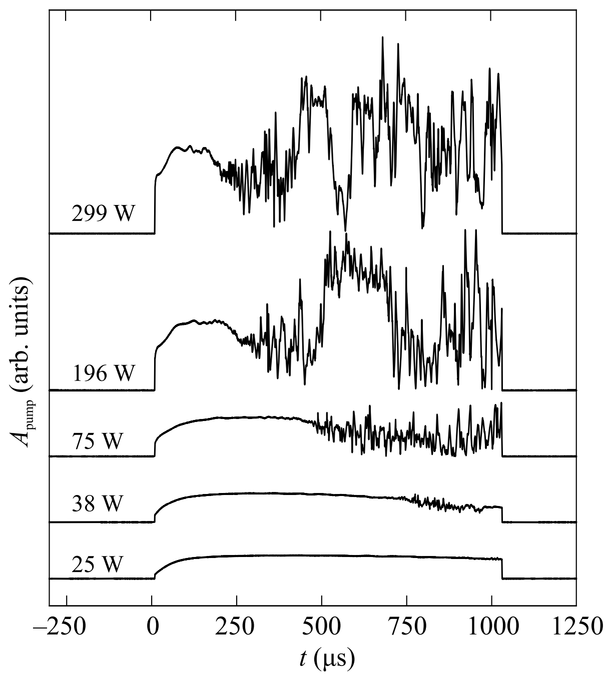

Рис. 2. Осциллограммы огибающей сигнала накачки, принимаемого в плазме на расстоянии $z = 10$ см от антенны, при различных уровнях мощности накачки. Параметры плазмы – те же, что для рис. 1b, c

На рисунке 3 типичный сигнал с СВЧ зонда приводится вместе с огибающими ВЧ накачки и пробной волны, проходящей через турбулентную область плазмы, вблизи заднего фронта импульса накачки.

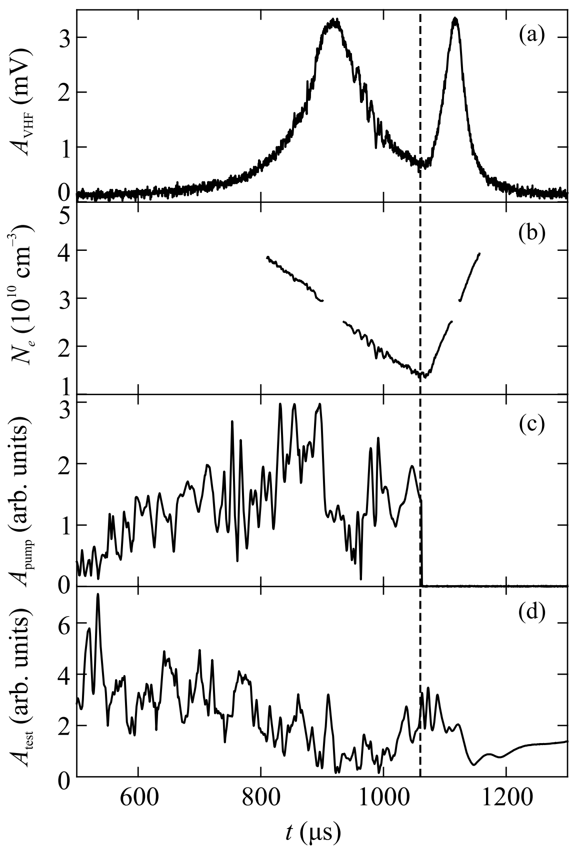

Рис. 3. Обусловленная турбулентностью модуляция ВЧ и СВЧ сигналов вблизи заднего фронта импульса накачки (показан пунктирной линией): (a) – огибающая отклика СВЧ зонда с резонансной частотой $f_0 = 7.595$ ГГц на расстоянии $z = 7$ см от плоскости антенны накачки, возбуждаемого на частоте $f = 7.8$ ГГц; (b) – динамика концентрации, восстановленная по огибающей отклика СВЧ зонда; (c) – осциллограмма огибающей сигнала накачки; (d) – осциллограмма огибающей пробной волны. Прием сигналов на частотах накачки и пробной волны осуществляется рамочной антенной в точке $z = -16$ см, источник пробной волны – рамочная антенна – установлена в точке $z = 48$ см; $B_0 = 90$ Гс, $P = 50$ Вт

Напомним принцип измерения нестационарных возмущений концентрации плазмы резонаторным СВЧ зондом. Согласно [15], если резонаторный СВЧ зонд возбуждается непрерывным сигналом на частоте f, превышающей резонансную частоту зонда в отсутствие плазмы f_0, то медленные изменения концентрации плазмы, обусловленные ее распадом либо диффузионным перераспределением в результате нагрева, приводят к отклику зонда в форме резонансной кривой $A_{\mathrm{VHF}}(t)$, максимумы которой соответствуют моментам наступления резонанса $f^2 = f_0^2 + f_{pe}^2(t)$. На рисунке 3a сигнал с СВЧ зонда имеет два резонансных пика. Первый пик приходится на стадию монотонного уменьшения концентрации плазмы в дакте за счет ее нагрева, второй соответствует монотонному нарастанию концентрации плазмы в процессе релаксации дакта (рис. 3b). Если на фоне "медленных" изменений концентрации присутствуют "быстрые" нестационарные флуктуации, как, например, при развитии турбулентности, то резонансная кривая оказывается модулированной во времени. На рисунке 3a модуляция зондового сигнала, вызванная турбулентностью, отчетливо видна на первом резонансном пике, во время импульса накачки, и отсутствует на втором пике, после окончания накачки.

Обусловленные турбулентностью пульсации с теми же характерными периодами порядка 1 мкс и более наблюдаются и в огибающих ВЧ сигналах, причем сигнал накачки и пробная волна модулируются сходным образом. После окончания импульса накачки модуляция пробной волны пропадает за время порядка 50 мкс (рис. 3d). Для сравнения, характерные времена остывания электронов в модифицированной области плазмы и релаксации крупномасштабного возмущения концентрации электронов (дакта) составляют 500 мкс и 1 мс соответственно, т.е. существенно больше.

Специально проводимая калибровка позволяет связать мгновенные значения амплитуды сигналов с СВЧ зондов с абсолютными значениями концентрации электронов в те же моменты времени на склонах резонансной кривой, т.е. на стадиях нарастания и спада отклика зонда [16]. Примеры волновых форм турбулентных возмущений концентрации, восстановленных в конкретных реализациях при синхронных измерениях СВЧ зондами в двух точках пространства, представлены на рис. 4a. В тех случаях, когда СВЧ зонды, разнесенные по продольной координате, находятся на одной магнитной силовой линии, регистрируемые ими возмущения концентрации хорошо коррелируют, особенно – в медленных вариациях с периодами более 10 мкс. Поперек магнитного поля масштаб корреляции турбулентных возмущений концентрации составляет $\Delta x \sim \Delta y \sim 1$ см. Относительный уровень пульсаций электронной концентрации не превышает нескольких процентов. Поперечное распределение среднеквадратичных значений амплитуды турбулентных возмущений концентрации электронов представлено на рис. 5a. Флуктуации, имеющие при заданной мощности накачки среднеквадратичную амплитуду $\delta N_e \sim 6 \cdot 10^8\,\text{см}^{-3}$, достаточно равномерно распределены по "дну" дакта, с некоторым увеличением уровня напротив провода антенны накачки ($y = 3.5$ см); к краю дакта ($y \simeq 5$ см) амплитуда возмущений уменьшается.

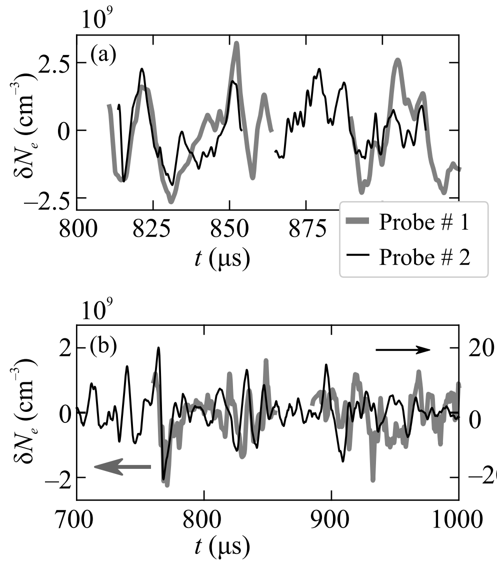

Рис. 4. (a) – временной ход возмущений концентрации полученных парой СВЧ зондов, установленных на одной магнитной силовой линии; расстояние между зондами $\Delta z = 4$ см, расстояние от антенны накачки до ближайшего к ней зонда – $\Delta z = 3$ см; $B_0 = 135$ Гс, $P = 50$ Вт; (b) – временной ход возмущений концентрации плазмы и магнитного поля, восстановленных по синхронным измерениям: магнитный зонд и СВЧ зонд установлены на близких силовых линиях с разнесением по поперечной координате $\Delta x \simeq 1$ см; магнитный зонд установлен на расстоянии $\Delta z = 29$ см от антенны накачки, СВЧ зонд на расстоянии $\Delta z = 7$ см от антенны; $B_0 = 135$ Гс, $P = 150$ Вт

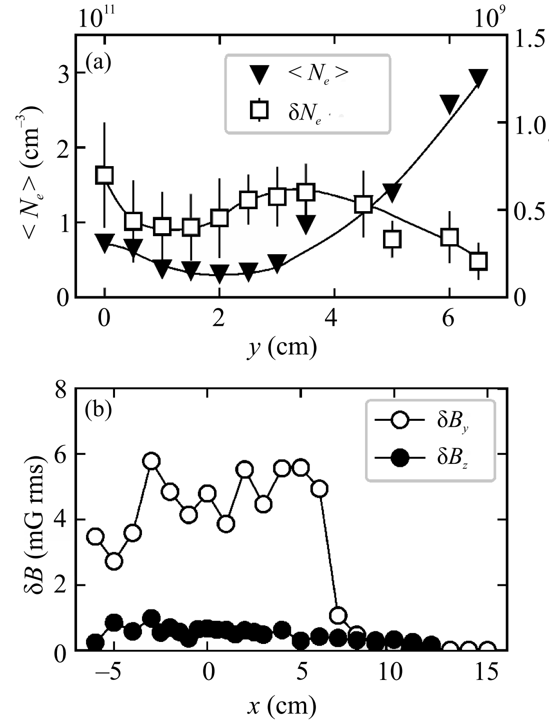

Рис. 5. (a) – Поперечные профили усредненного значения и амплитуды турбулентных возмущений концентрации спустя 800 мкс после начала импульса накачки в сечении $z = 3$ см; $B_0 = 135$ Гс, $P = 50$ Вт. (b) – Поперечные профили турбулентных возмущений магнитного поля (B_z и B_y компоненты) в сечении $z = 29$ см относительно плоскости антенны накачки; $B_0 = 135$ Гс, $P = 150$ Вт

На рисунке 4b приведены волновые формы низкочастотных возмущений магнитного поля. Турбулентные вариации магнитного поля также распределены по сечению дакта достаточно однородно, и, вместе с возмущениями электронной концентрации, ослабевают к краю дакта ($x \simeq 7$ см, рис. 5b). Интересно, что амплитуда поперечных магнитных полей δB_y, соответствующих продольным токам в плазме δj_z, на порядок превышает уровень флуктуаций продольного (аксиального) магнитного поля δB_z, обусловленных поперечными токами и вариациями давления плазмы.

Необходимо отметить и корреляцию волновых форм поперечной составляющей возмущений магнитного поля (δB_y), связанной с продольными электрическими токами, и турбулентных возмущений концентрации. Близость волновых форм $\delta N_e(t)$ и $\delta B_y(t)$, вплоть до совпадения "пик в пик", наблюдается для вариаций с характерными периодами $\delta t \geq \geq 10$ мкс при установке магнитного и СВЧ зондов на близких силовых линиях с поперечным разнесением $\Delta x, \Delta y \leq 1$ см. Таким образом, возмущения плотности и возбуждаемые продольные электрические токи тесно связаны друг с другом.

Все диагностики дают сходные данные по преобладающим периодам турбулентных возмущений плазмы. Спектр турбулентности сплошной, сверху он ограничен частотой $F_{\max} \simeq 800$ кГц. Для типичных параметров эксперимента полоса частот, в которой развивается турбулентность, лежит ниже частоты нижнегибридного резонанса f_{LH} и ионной плазменной частоты f_{pi}: $F_{\max} < f_{LH} \sim 1$ МГц $\ll f_{pi} \sim \sim 10$ МГц.

Еще одним важным свойством турбулентности является то, что она развивается только при условии прозрачности замагниченной плазмы для излучения на частоте f_{pump}. Напомним, что замагниченная плазма с концентрацией электронов N_e, соответствующей выполнению условия $f_{pe} \gg f_{ce}$, прозрачна для электромагнитных волн с частотами $f < f_{ce}$; для волн с частотами $f_{ce} < f \ll f_{pe}$ плазма непрозрачна. При заданной частоте f_{pump} реализовать оба режима взаимодействия ВЧ поля с плазмой можно, осуществляя сканирование по величине магнитного поля B_0. Результаты измерений параметров плазменной турбулентности в зависимости от циклотронной частоты электронов f_{ce} при заданной частоте $f_{\rm pump}$ приводятся на рис. 6. В полосе непрозрачности вся

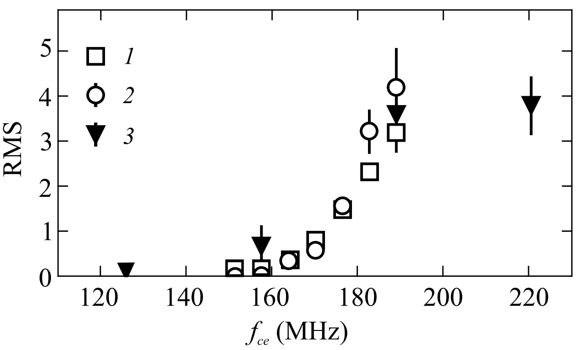

Рис. 6. Зависимость среднеквадратичных значений амплитуды турбулентных возмущений концентрации и магнитного поля, а также средней амплитуды регистрируемого в плазме сигнала накачки от циклотронной частоты спустя 800 мкс после начала импульса накачки. Измерения концентрации, возмущений магнитного поля и амплитуды накачки выполнены, соответственно, на расстояниях $z = 7$ см, 29 см и 22 см от плоскости антенны накачки; $P = 150$ Вт. Маркерами обозначены среднеквадратичные величины: *1* – $2 \cdot \delta B$ (мГс); *2* – $< A^2_{\rm pump} >$ (отн. ед.); *3* – δN_e (10^8 см$^{-3}$)

энергия ВЧ импульса, подводимого к антенне, сосредоточена в ее ближней зоне. При этом происходит нагрев электронов плазмы в опирающейся на антенну магнитной силовой трубке; формируется дакт пониженной концентрации плазмы; наблюдается и эффект волноводного захвата в дакт пробной свистовой волны, для которой плазма остается прозрачной. Однако, несмотря на то, что электроны в достаточной степени разогреты и профиль концентрации плазмы модифицирован за счет термодиффузии приблизительно так же, как и при воздействии накачки в полосе прозрачности, турбулентность не развивается.

Обсудим полученные результаты. Турбулентность возникает только в поле ВЧ накачки в форме распространяющейся свистовой волны. Релаксация турбулентности при выключении накачки происходит быстро, на временах, существенно меньших времени релаксации электронной температуры и крупномасштабного возмущения плазмы – дакта с пониженной концентрацией. В динамике, перед появлением самомодуляции, наблюдается уменьшение амплитуды сигнала ВЧ накачки по всему сечению дакта, что можно интерпретировать как включение дополнительного механизма потерь ВЧ энергии на раскачку турбулентности. Все вышеперечисленное позволяет предположить, что источником турбулентности являются не возмущение параметров плазмы в целом, появление градиентов концентрации либо потоков заряженных частиц, но непосредственно ВЧ волновое поле. Конкретный механизм генерации турбулентности будет определен в дальнейших исследованиях.

На данном этапе некоторые выводы относительно структуры турбулентности могут быть получены из сопоставления результатов зондовых измерений флуктуаций концентрации и возмущений магнитного поля. Как было указано выше, неоднородности концентрации вытянуты вдоль магнитного поля и имеют поперечные масштабы порядка 1 см; разумно предположить, что такой же характерный масштаб модуляции в поперечном к магнитному полю направлении имеют и продольные токи. Воспользовавшись законом Ампера, из магнитных измерений можно оценить плотность продольных токов и, соответственно, дрейфовую скорость электронов, формирующих ток. Оценка выглядит как $\delta j_z = eN_e v_z \sim \sim c\delta B_y/4\pi\delta x$, где e – заряд электрона, v_z – продольная скорость электронов, c – скорость света в вакууме. Для типичных параметров возмущений плазмы в дакте ($N_e = 3 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$, $T_e = 3$ эВ, $\delta B_y \sim 5$ мГс, $\Delta x \sim 1$ см) дрейфовая скорость электронов, образующих ток, $v_z \sim 10^6$ см/с. Эта скорость в несколько раз больше скорости ионного звука ($V_s = 2.7 \cdot \cdot 10^5$ см$^{-3}$), но значительно меньше тепловой скорости электронов $V_{Te} = 10^8$ см/с.

Известно, что развитие и релаксация узких, сильно вытянутых вдоль магнитного поля неоднородностей замагниченной плазмы могут происходить в режиме так называемого "униполярного" переноса с возбуждением вихревых электрических токов [16]. Например, для областей с повышенной концентрацией плазмы вынос замагниченных электронов происходит вдоль внешнего магнитного поля, слабо замагниченные ионы уходят поперек магнитного поля, а замыкание образующейся токовой цепи происходит по окружающей (или фоновой) плазме. За счет геометрического фактора (площадь поперечного сечения отдельной неоднородности существенно меньше, чем площадь ее боковой поверхности) плотность продольных токов при униполярном режиме развития и релаксации неоднородностей может значительно превышать плотность токов поперек магнитного поля, что согласуется с результатами измерений (см. рис. 5b). Кроме того, параметры плазмы, характерные поперечные масштабы неоднородностей и оцениваемая величина продольной скорости электронов в данной работе близки к результатам, полученным ранее в экспериментах, в которых униполярный режим перераспределения плазмы наблюдался в явном виде [16]. Если предположить, что характерный продольный масштаб неоднородностей составляет $\delta z \sim 20$ см, а поперечный $\delta x \sim \delta y \sim 1$ см, то электроны покидают области с повышенной концентрацией вдоль магнитного поля за время порядка 20 мкс. Считая, согласно [16], что слабо замагниченные ионы покидают области повышенной концентрации плазмы поперек магнитного поля со скоростью, в несколько раз меньшей скорости ионного звука, мы можем получить оценку времени ухода ионов в 10−20 мкс, которая близка к времени ухода электронов вдоль поля. Оцениваемое таким образом время жизни неоднородностей концентрации плазмы по порядку величины согласуется с временем релаксации неоднородностей после окончания импульса накачки (50 мкс), полученным из анализа огибающей пробной волны (см. рис. 3d).

Турбулентность, подобная описанной в данной работе, может развиваться в ионосферных активных экспериментах, проводимых с пучками мощных радиоволн и с бортовыми радиопередатчиками космических аппаратов (КА). Отметим, что хотя турбулентные возмущения концентрации замагниченной плазмы при типичных параметрах эксперимента насыщаются на уровне, не превышающем 3 % от фона по среднеквадратичному значению, самомодуляция волны накачки за счет развития турбулентности оказывается очень глубокой, до 100 %. Таким образом, эффекты турбулентности могут существенно снижать качество сигнала, излучаемого с помощью передатчиков, устанавливаемых на КА. Возможные эффекты турбулентности необходимо учитывать при планировании активных космических экспериментов, например, по воздействию на магнитосферную плазму с использованием свистовых волн, излучаемых с борта ионосферного КА [18], включая введение ограничений на длительность радиоимпульсов и их мощность.

Эксперименты проведены с использованием уникальной научной установки "Комплекс крупномасштабных геофизических стендов ИПФ РАН" (УНУ ККГС). Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект # 21-12-00385.

1. Б. Б. Кадомцев, О. П. Погуце, в сб.: *Вопросы теории плазмы*, ред. М. А. Леонтович, Атомиздат, М. (1967), вып. 5.
2. А. В. Гуревич, УФН **177**, 1145 (2007) [A. V. Gurevich, Phys.-Uspekhi **50**, 1091 (2007)].
3. В. Л. Фролов, Н. В. Бахметьева, В. В. Беликович, Г. Г. Вертоградов, В. Г. Вертоградов, Г. П. Комраков, Д. С. Котик, Н. А. Митяков, С. В. Поляков, В. О. Рапопорт, Е. Н. Сергеев, Е. Д. Терещенко, А. В. Толмачева, В. П. Урядов, Б. З. Худукон, УФН **177**, 330 (2007) [V. L. Frolov, N. V. Bakhmet'eva, V. V. Belikovich, G. G. Vertogradov, V. G. Vertogradov, G. P. Komrakov, D. S. Kotik, N. A. Mityakov, S. V. Polyakov, V. O. Rapoport, E. N. Sergeev, E. D. Tereshchenko, A. V. Tolmacheva, V. P. Uryadov, and B. Z. Khudukon, Phys.-Uspekhi **50**, 315 (2007)].
4. С. М. Грач, Е. Н. Сергеев, Е. В. Мишин, А. В. Шиндин, УФН **186**, 1189 (2016) [S. M. Grach, A. V. Shindin, E. N. Sergeev, and E. V. Mishin, Physics-Uspekhi **59**, 1091 (2016)].
5. A. V. Streltsov, J.-J. Berthelier, A. A. Chernyshov, V. L. Frolov, F. Honary, M. J. Kosch, R. P. McCoy, E. V. Mishin, and M. T. Rietveld, Space Sci. Rev. **214**, 118 (2018).
6. A. Mahmoudian, W. A. Scales., S. Taylor, Y. Morton, P. A. Bernhardt, S. J. Briczinski, and S. Ghader, Radio Science **53**, 775 (2018).
7. Н. Ф. Благовещенская, Т. Д. Борисова, В. А. Корниенко, В. Л. Фролов, М. Т. Ритвельд, А. Брекке, Известия вузов. Радиофизика **50**, 678 (2007) [N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova, V. A. Kornienko, V. L. Frolov, M. T. Rietveld, and A. Brekke, Radiophys. Quantum Electron. **30**, 619 (2007)].
8. S. A. Pulinets and V. V. Selegei, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics **48**, 149 (1986).
9. M. C. Kelley, T. L. Arce, J. Salowey, M. Sulzer, W. T. Armstrong, M. Carter, and L. Duncan, J. Geophys. Res. (Space Phys.) **100**, 17367 (1995).
10. Х. Альвен, К.-Г. Фельтхаммар, *Космическая электродинамика*, Мир, М. (1967) [H. Alfvén and C.-G. Fälthammar, *Cosmical electrodynamics*, Clarendon press, Oxford (1963)].
11. R. L. Stenzel and W. Gekelman, Phys. Fluids **20**, 108 (1977).
12. М. П. Брижинев, В. В. Буланин, Б. Г. Еремин, А. В. Костров, А. В. Петров, С. Г. Ревин, Письма в ЖЭТФ **40**, 332 (1984) [M. P. Brizhinev, V. V. Bulanin, B. G. Eremin, A. V. Kostrov, A. V. Petrov, and S. G. Revin, JETP Lett. **40**, 1129 (1984)].
13. А. В. Костров, А. В. Стриковский, А. В. Шашурин, Физика плазмы **27**, 149 (2001) [A. V. Kostrov, A. V. Strikovskiy, and A. V. Shashurin, Plasma Physics Reports **27**, 137 (2001)].
14. В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Е. А. Шорохова, Н. А. Айдакина, М. Е. Гущин, И. Ю. Зудин, С. В. Коробков, А. В. Костров, М. Парро, Ж.-Л. Рош, Письма

в ЖЭТФ **101**, 342 (2015) [V. L. Frolov, V. O. Rapoport, E. A. Shorokhova, N. A. Aidakina, M. E. Gushchin, I. Yu. Zudin, S. V. Korobkov, A. V. Kostrov, M. Parrot, and J.-L. Rauch, JETP Lett. **101**, 313 (2015)].
15. R. L. Stenzel, Rev. Sci. Instrum. **47**, 603 (1976).
16. N. Aidakina, M. Gushchin, I. Zudin, S. Korobkov, and A. Strikovskiy, Phys. Plasmas **25**, 122104 (2018).
17. Н. А. Айдакина, М. Е. Гущин, И. Ю. Зудин, С. В. Коробков, А. В. Костров, А. В. Стриковский, Письма в ЖЭТФ **93**, 555 (2011) [N. A. Aidakina, M. E. Gushchin, I. Yu. Zudin, S. V. Korobkov, A. V. Kostrov, and A. V. Strikovskii, JETP Lett. **93**, 498 (2011)].
18. U. S. Inan, T. F. Bell, J. Bortnik, and J. M. Albert, J. Geophys. Res. (Space Phys.) **108**, 1186 (2003).