

04.2

Влияние градиента концентрации плазмы на возбуждение ионно-циклотронных колебаний в омических разрядах токамака ТУМАН-3М

© А.А. Белокуров, Г.И. Абдуллина, Л.Г. Аскинази, Н.А. Жубр, В.А. Корнев, С.В. Крикунов, С.В. Лебедев, Д.В. Разуменко, А.С. Тукачинский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: belokurov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 июня 2019 г.

В окончательной редакции 5 июня 2019 г.

Принято к публикации 10 июня 2019 г.

В токамаке ТУМАН-3М в разрядах с омическим нагревом обнаружены колебания на ионно-циклотронной (ИЦ) частоте в разрядах в дейтерии и водороде. Быстрые магнитные зонды, расположенные по полоидальному обходу плазменного шнура, способны различить несколько гармоник ионно-циклотронной частоты основного изотопа плазмы. При инжекции топливной макрочастицы (или пеллеты) интенсивность омических ИЦ-колебаний существенно уменьшается, а после полного испарения пеллеты возвращается к исходному уровню. Определение локализации и условий возбуждения ИЦ-колебаний в омическом режиме представляет особый интерес. На основе теории возбуждения дрейфово-циклотронной неустойчивости и численного моделирования сценариев с омическим переходом в режим улучшенного удержания и с инжекцией топливной пеллеты исследовано влияние параметров плазмы, в первую очередь градиента концентрации, на возможность возбуждения ИЦ-колебаний.

Ключевые слова: плазма, токамак, ионно-циклотронные колебания, пеллет-инжекция.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.18.48234.17907

В плазме токамака ТУМАН-3М были обнаружены колебания на ионно-циклотронной частоте в омических разрядах и разрядах с нейтральным нагревным пучком. Наблюдение магнитных колебаний на токамаке ТУМАН-3М производится с помощью массива из шестнадцати быстрых магнитных зондов, расположенных по полоидальному обходу внутри вакуумной камеры. Полоса пропускания усилителей и частота преобразования АЦП позволяют зарегистрировать колебания частотой вплоть до 100–120 МГц. Более подробное описание диагностики и технические характеристики зондов приведены в [1].

В эксперименте стабильно наблюдается несколько гармоник омических ионно-циклотронных (ИЦ) колебаний на частоте основного изотопа плазмы. Пространственная и временная структура, а также причины специфического соотношения между интенсивностью различных гармоник омических ИЦ-колебаний являются предметом для отдельного исследования и не будут освещены в настоящей работе. Основная цель данного исследования заключается в том, чтобы выяснить степень влияния параметров плазмы, в первую очередь электронной концентрации и градиента концентрации, на возможность возбуждения ИЦ-колебаний.

В сценариях с инжекцией замороженной топливной макрочастицы (пеллеты) из-за испарения пеллеты происходит значительное изменение профиля концентрации в периферийной области плазмы. Рост периферийной концентрации также обусловлен тем, что испарение

пеллеты инициировало переход в режим улучшенного удержания (H-моду) [1]. H-мода существует в течение примерно 3 ms, затем происходит обратный переход в L-моду. Описанная эволюция режимов удержания плазмы видна на сигнале среднечордовой концентрации плазмы и уровня свечения линии D_α (рис. 1, a); момент перехода в H-моду заметен на сигнале быстрых магнитных зондов: интенсивность омических ИЦ-колебаний (ohmic ICE) после испарения пеллеты и перехода в H-моду существенно уменьшается (начиная с четвертой гармоники исчезает полностью), затем после обратного перехода в L-моду ИЦ-колебания регистрируются вновь с интенсивностью, превышающей значения до испарения пеллеты (рис. 1, a).

В характерных омических разрядах со спонтанным переходом в режим улучшенного удержания активность ИЦ-колебаний проявляется на финальной стадии разряда (рис. 2, a). Если в разряде присутствовал переход в H-моду, то примерно через 10 ms после LH-перехода магнитные зонды регистрируют несколько гармоник ИЦ-колебаний. В некоторых аналогичных разрядах без LH-перехода ИЦ-колебаний зарегистрировано не было или же колебания слабо выделялись на фоне шума (рис. 3, a). Таким образом, можно предположить, что наличие увеличенного градиента концентрации, появляющегося при переходе в H-моду, способствует возбуждению ИЦ-колебаний.

Для того чтобы оценить степень влияния градиента концентрации на возможность возбуждения

ИЦ-колебаний, была привлечена теория развития дрейфово-циклотронной неустойчивости [2,3]. Согласно этой теории, в неоднородной плазме колебания с частотами, кратными ионно-циклотронной, могут быть неустойчивыми при длине волны, меньшей ионного ларморовского радиуса ρ_i . При поперечном распространении волны условие возникновения неустойчивости выглядит следующим образом [3]:

$$\chi\rho_i > 2\sqrt{\frac{m_e}{m_i}}\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_{ce}}{\omega_{pe}}\right)^2}$$

или

$$\chi\rho_i - 2\sqrt{\frac{m_e}{m_i} + \left(\frac{V_A}{c}\right)^2} > 0. \quad (1)$$

Здесь $\chi = \left|\frac{1}{n}\frac{\partial n}{\partial r}\right|$ — обратная характерная длина изменения концентрации плазмы, ω_{ce} и ω_{pe} — циклотронная и плазменная частоты электронов соответственно, V_A — альфвеновская скорость, c — скорость света, m_e и m_i — массы электронов и ионов соответственно. В дальнейшем величину разности в формуле (1), описывающую выполнение критерия, будем обозначать как ΔK ; положительные значения ΔK соответствуют выполнению условий возбуждения ИЦ-колебаний.

В предположении, что омические ИЦ-колебания в токамаке ТУМАН-3М распространяются поперечно, данный критерий был применен к характерным экспериментальным сценариям с пеллет-инжекцией и омическим ЛН-переходом.

На основе показаний интерферометрической диагностики и периферийных измерений концентрации плазмы ленгмюровским зондом для исследуемых сценариев восстанавливался профиль концентрации плазмы; профиль ионной температуры был построен при помощи численного моделирования посредством кода ASTRA [4] и нормировки на измеренную с помощью корпускулярной диагностики температуру ионов в центре плазменного шнура. Влияние испарения пеллеты на профили концентрации и температуры было рассчитано с помощью кода ASTRA.

Зная распределение параметров плазмы, можно проверить выполнение условий критерия (1) при эволюции разряда. В различные моменты времени соотношение может меняться: как видно из формулы (1), более активной раскашке ИЦ-колебаний способствует больший относительный градиент концентрации, большая ионная температура и меньшая величина магнитного поля.

Рассмотрим сценарий с пеллет-инжекцией (рис. 1, а). Профиль концентрации до пеллет-инжекции соответствует выполнению критерия (1) вблизи от места расположения регистрирующего ИЦ-колебания магнитного зонда HFS (на стороне сильного магнитного поля, см. рис. 1, б). Моделирование эволюции концентрации и температуры плазмы при испарении пеллеты показало, что в области глубже транспортного барьера происходит уплощение профиля концентрации, что приводит к

прекращению выполнения критерия (1) в этой области. Такое предположение соответствует экспериментально наблюдаемому уменьшению интенсивности омических ИЦ-колебаний. Тем не менее на нижних гармониках колебания в эксперименте продолжают регистрироваться быстрым магнитным зондом. Возможно, это связано с тем, что критерий (1) продолжает выполняться в других пространственных областях разряда. После испарения пеллеты и выхода из Н-моды градиент концентрации превышает значение до инжекции, что соответствует лучшему выполнению критерия (1) в более широкой области (рис. 1, б). Такое поведение качественно совпадает с экспериментальными наблюдениями: после испарения пеллеты интенсивность ИЦ-колебаний превышает первоначальный уровень. Необходимо отметить, что в данном разряде после 70 ms газонапуск был существенно менее интенсивным, чем в районе 50 ms. Возможно, меньшее охлаждение периферии, обусловленное меньшим газонапуском, также способствовало увеличению интенсивности омических ИЦ-колебаний (так как ионная температура входит в $\chi\rho_i$, левую часть критерия (1)).

Для пары характерных омических разрядов (рис. 2, а, 3, а), различающихся наличием и отсутствием ЛН-перехода, был проведен схожий анализ выполнения критерия (1). На основе данных интерферометрической диагностики был построен профиль электронной концентрации; также параметры периферийной плазмы (концентрация, электронная температура) определялись при помощи ленгмюровского зонда. На основе данных профилей концентрации оказалось возможным проверить выполнение критерия (1) в разрядах с омическим ЛН-переходом и без ЛН-перехода. Результаты представлены на рис. 2, б и 3, б.

Из рис. 2, б (разряд с омическим ЛН-переходом) видно, что для начального профиля концентрации (50 ms) критерий не выполняется как на стороне слабого (LFS), так и на стороне сильного поля (HFS). Такой результат соответствует отсутствующим или неразличимым на уровне фона ИЦ-колебаниям в начальной фазе разряда (рис. 2, а). При переходе в Н-моду градиент на периферии увеличивается, в то же время ближе к концу разряда (80 ms) магнитное поле спадает, эти факторы способствуют возбуждению ИЦ-колебаний в периферийной области разряда (рис. 2, а). В конце разряда увеличенный градиент концентрации сохраняется, так как плазма остается в режиме улучшенного удержания. Радиальный профиль величины ΔK (локальное выполнение критерия (1)) показан на рис. 2, б.

В сценарии с ЛН-переходом критерий (1) выполняется на стороне слабого поля с середины малого радиуса до последней замкнутой магнитной поверхности и в узкой (примерно 1 см) области снаружи от нее (рис. 2, б). Концентрация плазмы на периферии, измеренная с помощью ленгмюровского зонда, хорошо „сшивается“ с профилем концентрации; таким образом, на основе зондовых измерений можно заключить, что в области разомкнутых силовых линий критерий (1) может выполняться только

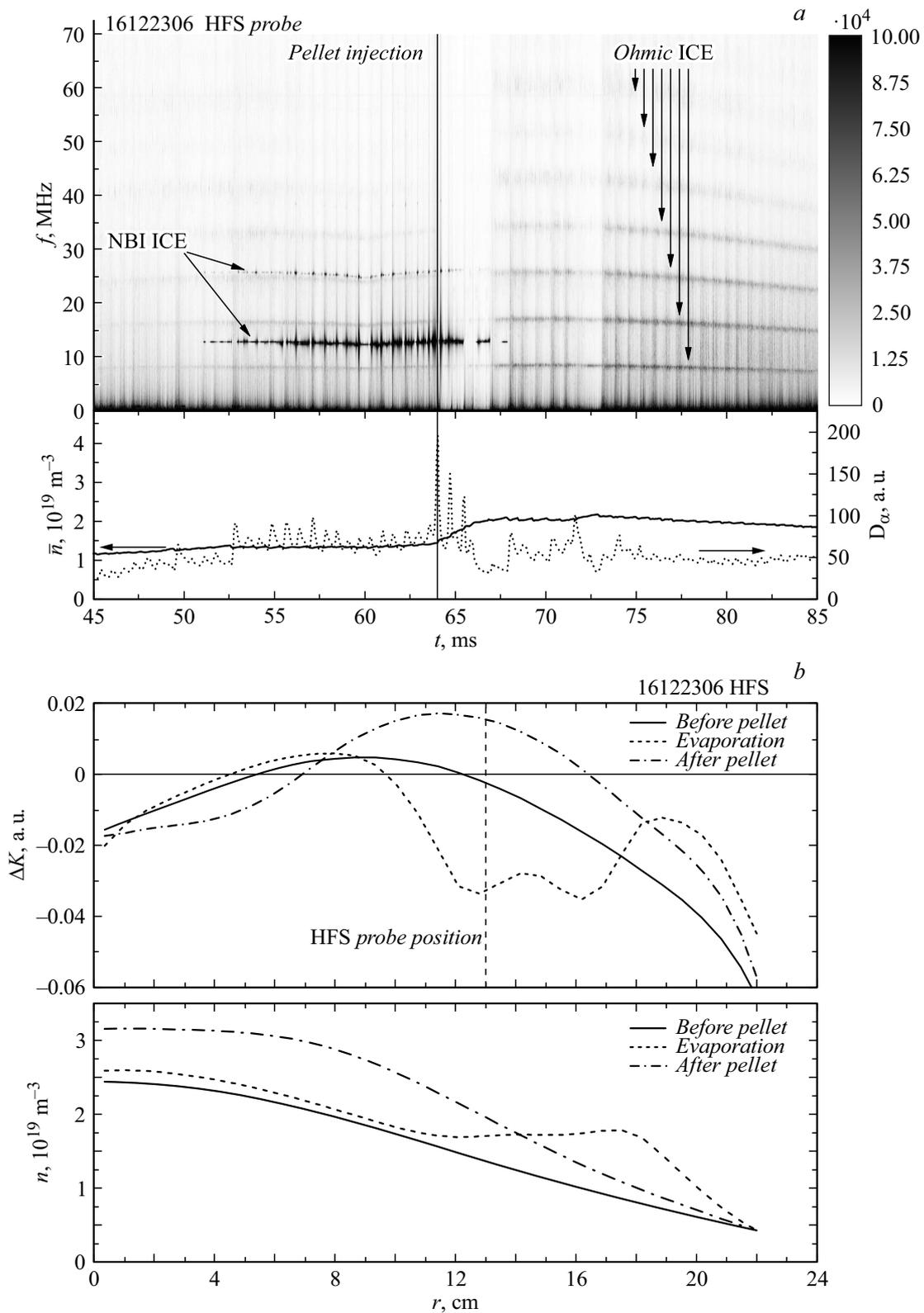


Рис. 1. *a* — спектрограмма магнитных колебаний и эволюция среднехордовой электронной концентрации и свечения линии D_α в разряде с пеллет-инжекцией (64 ms) и вызванным испарением пеллеты LH-переходом. NBI ICE — ионно-циклотронные колебания, вызванные быстрыми ионами при инъекции нейтрального нагревного пучка. *b* — расчетная эволюция профиля электронной концентрации при пеллет-инжекции и локальное выполнение критерия (1) ($\Delta K > 0$) в зависимости от параметров плазмы в три момента времени: до инъекции, в максимуме кривой испарения и после испарения.

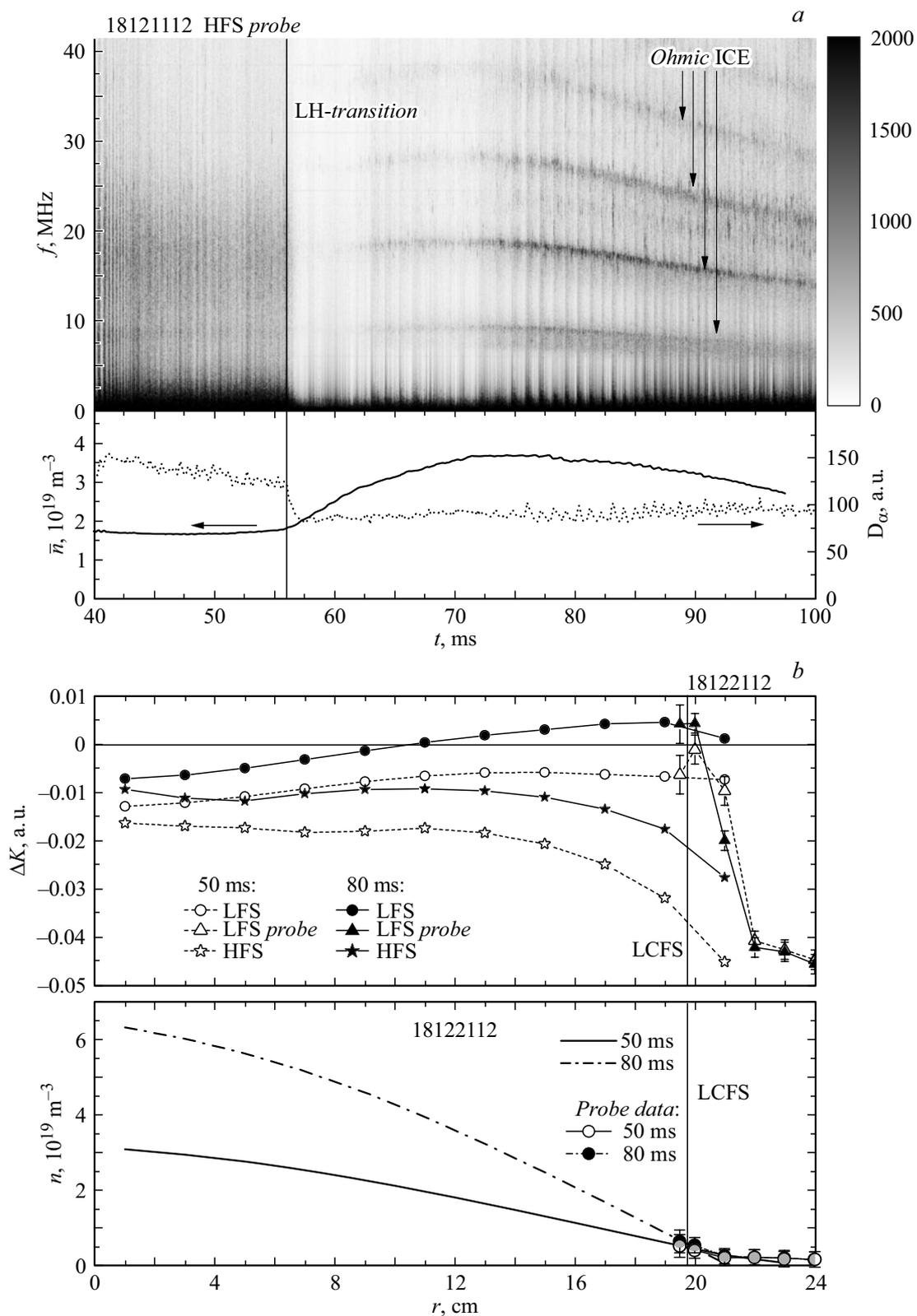


Рис. 2. *a* — спектрограмма магнитных колебаний и эволюция среднехордовой электронной концентрации и свечения линии D_{α} в разряде с омическим ЛН-переходом (на 56 ms). *b* — выполнение критерия (1) ($\Delta K > 0$) в зависимости от радиуса и соответствующие профили электронной концентрации плазмы в начальной фазе разряда (50 ms) и в фазе улучшенного удержания (80 ms). После ЛН-перехода градиент концентрации увеличивается, что приводит к возбуждению ИЦ-колебаний. Вертикальная линия LCFS показывает положение последней замкнутой магнитной поверхности.

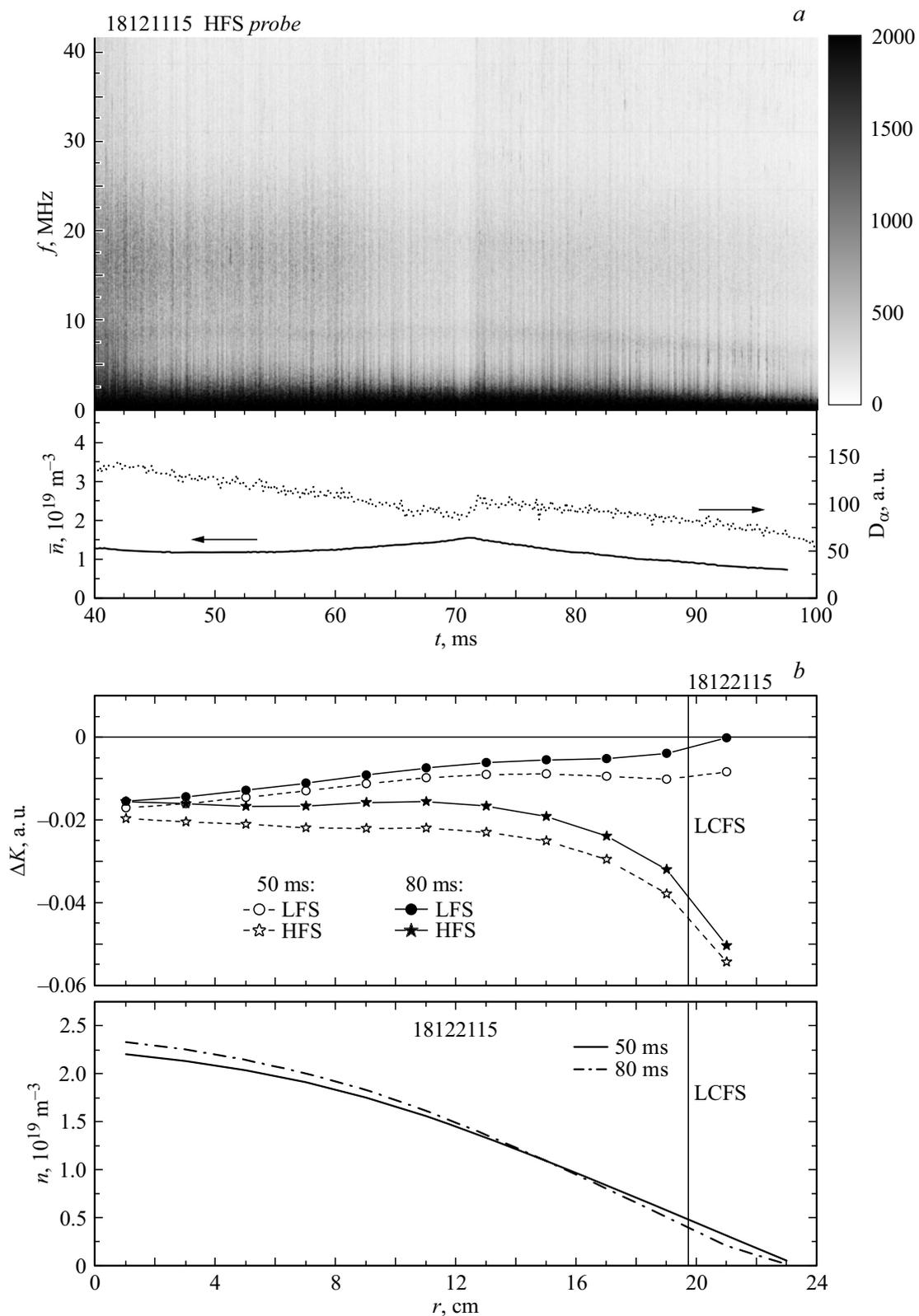


Рис. 3. *a* — спектрограмма магнитных колебаний и эволюция среднехордовой электронной концентрации и свечения линии D_{α} в разряде без улучшения удержания. *b* — выполнение критерия (1) ($\Delta K > 0$) в зависимости от радиуса в два момента времени (50 и 80 ms) и соответствующие профили концентрации плазмы. Профиль концентрации меняется незначительно, поэтому явного возбуждения ИЦ-колебаний не происходит. Вертикальная линия LCFS показывает положение последней замкнутой магнитной поверхности.

рядом с последней замкнутой магнитной поверхностью, и ИЦ-колебания, согласно теории, с наибольшей вероятностью должны возбуждаться в основном объеме плазмы на периферии или же в области примерно 1 см шириной снаружи от последней замкнутой магнитной поверхности.

Необходимо указать на факт, не укладывающийся в концепцию, определяющую возбуждение ИЦ-колебаний согласно критерию (1). Согласно расчетам, на стороне сильного поля не должно происходить возбуждения неустойчивостей, приводящих к ИЦ-колебаниям (см. линии для HFS на рис. 2, *b*), в то время как экспериментально более выраженный сигнал наблюдается именно на стороне сильного поля. Частота наблюдаемых ИЦ-колебаний соответствует значениям большого радиуса, близким к координатам магнитных зондов на стороне сильного поля, что свидетельствует в пользу того, что ИЦ-колебания возбуждаются также на стороне сильного магнитного поля.

На рис. 3, *b* представлены результаты расчетов выполнения критерия (1) в омическом разряде без перехода в режим улучшенного удержания. Изменения профиля концентрации плазмы несущественно влияют на возможность возбуждения ИЦ-колебаний, так как по всему малому радиусу критерий (1) не выполняется. Экспериментальные наблюдения показывают слабые (соотношение сигнал–шум примерно 1.2) колебания на ИЦ-частоте. Учитывая, что профиль электронной концентрации восстановлен по хордовым сигналам с некоторой погрешностью, можно допускать генерацию ИЦ-колебаний на периферии со стороны слабого поля (где критерий (1) ближе всего к выполнению). Тем не менее такие ИЦ-колебания оказываются существенно слабее, чем в разряде с LH-переходом (где соотношение сигнал–шум на той же фундаментальной гармонике примерно равно 4.5).

На основании анализа разрядов с эволюцией ИЦ-колебаний, в которых существенно меняется градиент концентрации, можно сделать вывод о существенном влиянии формы профиля концентрации плазмы на возбуждение ИЦ-колебаний: больший градиент способствует раскачке ИЦ-колебаний, в то время как уплощение профиля, наоборот, приводит к тому, что ИЦ-колебания имеют меньшую интенсивность.

Тем не менее анализ на основе расчета выполнения критерия (1) не дает однозначного ответа на вопрос о действительной локализации колебаний. Несмотря на установленную качественную зависимость возможности генерации ИЦ-колебаний от градиента концентрации, совпадающую с экспериментальными наблюдениями, некоторые наблюдения оказываются невозможно описать с помощью предложенной в работах [3,4] модели. Возможная причина расхождения заключается в недостаточно точно определенных профилях концентрации (особенно в области транспортного барьера) и ионной температуры.

Наблюдаемая в эксперименте асимметрия (более интенсивные колебания на стороне сильного поля и выше экваториальной плоскости), а также временная и спектральная структура являются предметом отдельного исследования.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе (проведение экспериментов на токамаке ТУМАН-3М) и Российского научного фонда (моделирование и анализ разрядов с ИЦ-колебаниями, проект № 16-12-10285-П).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Askinazi L.G., Belokurov A.A., Gin D.B., Kornev V.A., Lebedev S.V., Shevelev A.E., Tukachinsky A.S., Zhubr N.A.* // Nucl. Fusion. 2018. V. 58. N 8. P. 082003.
- [2] *Михайловский А.Б., Тимофеев А.В.* // ЖЭТФ. 1963. Т. 44. В. 3. С. 919–921.
- [3] *Mikhailovsky A.B.* // Nucl. Fusion. 1971. V. 11. N 4. P. 323–328.
- [4] *Pereverzev G.V., Yushmanov P.N.* // Max-Planck IPP Report 5/98. Garching, Germany, 2002. 147 p.