

04

## Анализ потерь быстрых ионов, вызванных распространением тороидальных альфвеновских мод в плазме сферического токамака Глобус-М2

© И.М. Балаченков, Н.Н. Бахарев, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, М.В. Ильясова, Г.С. Курский, В.Б. Минаев, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, О.М. Скрекель, А.Ю. Тельнова, Е.М. Хилькевич, А.Е. Шевелев, П.Б. Щеголев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: balachenkov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 2 августа 2021 г.  
В окончательной редакции 9 октября 2021 г.  
Принято к публикации 10 октября 2021 г.

С увеличением магнитного поля до 0.8 Т и тока по плазме до 0.4 МА в токамаке Глобус-М2 уровень потерь быстрых ионов в разрядах с тороидальными альфвеновскими модами (ТАЕ) снизился по сравнению с установкой Глобус-М. С учетом данных о потерях, полученных в разрядах с повышенным полем и током, проанализирована регрессионная зависимость снижения уровня сигнала анализатора атомов перезарядки в канале с энергией, близкой к энергии инжекции нейтрального пучка, от относительной амплитуды возмущения, величины тороидального магнитного поля и тока по плазме. Обнаружена зависимость от амплитуды ТАЕ в степени порядка  $\sim 0.5$  и обратная пропорциональность произведению магнитного поля и тока по плазме, которая, по всей видимости, определяется величиной тока по плазме, ввиду слабой зависимости от магнитного поля. Полученный результат свидетельствует о том, что потери быстрых ионов в токамаке Глобус-М2 вследствие возбуждения ТАЕ преимущественно обусловлены смещением траекторий пролетных частиц к границе плазмы. С повышением магнитного поля и тока также уменьшились провалы в потоке нейтронов в моменты всплеск тороидальных мод.

**Ключевые слова:** тороидальные альфвеновские моды, NPA, сферический токамак, потери быстрых ионов.

DOI: 10.21883/JTF.2022.01.51850.227-21

### Введение

Тороидальные альфвеновские моды (ТАЕ) способны оказывать влияние на удержание быстрых частиц в токамаке, так как их возбуждение происходит за счет резонанса с быстрыми ионами, скорость которых порядка альфвеновской скорости  $v_A = B_0 / \sqrt{\mu_0 \rho_i}$  ( $B_0$  — невозмущенное локальное магнитное поле,  $\rho_i$  — массовая плотность ионов,  $\mu_0$  — вакуумная магнитная проницаемость). Условие резонанса выполняется для частиц со скоростями  $v_A$  и  $v_A/3$  [1,2]. Источником энергии для возбуждения ТАЕ, как правило, являются ионы высокой энергии, образовавшиеся либо при перезарядке пучка нейтралей, инжектируемого в плазму (NBI), либо за счет ионно-циклотронного (ICRH) нагрева [2,3]. Сообщается также и о дестабилизации ТАЕ в режимах с электрон-циклотронным (ECRH) нагревом [4]. ТАЕ нередко наблюдались в плазме сферических токамаков: MAST [5], NSTX [6], START [7], Глобус-М [8,9], так как одним из параметров, влияющих на величину зазора, является аспектное отношение, и для токамаков с малым аспектным отношением величина частотного зазора, в котором могут существовать тороидальные моды, больше, чем для классических [10]. Альфвеновские моды оказывают существенное влияние на нейтронный выход не только из-за того, что могут приводить к

окончательной потере быстрых частиц, но и в связи с тем, что приводят к их перераспределению как в пространстве скоростей (замедление), так и в физическом пространстве. Перенос быстрых частиц в периферийные области с более низкой температурой и концентрацией, во-первых, может уменьшать время замедления быстрых ионов, во-вторых, напрямую приводит к уменьшению нейтронного выхода из-за уменьшения числа актов реакций при низкой плотности. В классических токамаках именно ТАЕ представляют наибольшую опасность с точки зрения потерь быстрых ионов: потери, связанные с ними, могут достигать 70% всех инжектированных в плазму ионов [3]. Для сферических токамаков потери быстрых ионов, связанные непосредственно с ТАЕ, менее исследованы. Так, в [11] сообщается о снижении потока нейтронов до 15% в NSTX вследствие так называемой альфвеновской лавины, а в [12] — об уменьшении потока нейтронов на 25% во время fishbone-неустойчивости, развивающейся после ТАЕ в токамаке MAST. Потери, связанные непосредственно с отдельными ТАЕ в сферических токамаках, требуют отдельного рассмотрения.

Особенно важным оказывается изучение влияния ТАЕ на удержание быстрых ионов именно в контексте термоядерного источника нейтронов на основе сферического

токамака, работу которого планируется осуществлять в квазинепрерывном режиме, т.е. с преимущественной долей тока, поддерживаемой неиндуктивными методами (нейтральной инжекцией, радиочастотной генерацией тока). Существенная часть нейтронного выхода такого источника должна быть обусловлена взаимодействием быстрых ионов, образующихся за счет инжекции нейтрального пучка, с тепловой плазмой и друг с другом. Не меньшее влияние на баланс энергии тороидальные моды могут оказывать в установках реакторного типа (ITER [3]), где за поддержание реакции отвечают термоядерные альфа-частицы, которые, достаточно замедлившись, также способны терять свою энергию в резонансе с альфвеновской волной. При этом вопрос предсказания величины потерь ионов, вызванных ТАЕ, кажется авторам недостаточно проработанным и требует отдельного исследования. Для анализа подобных зависимостей, как правило, используются два подхода, один из которых — моделирование при помощи численных кодов (например, для анализа взаимодействия альфвеновских мод с частицами используется код ASCOT [13]), а другой — состоит в построении скейлингов или регрессий на основании большого числа экспериментальных данных. Каждый из этих подходов обладает своим набором достоинств и недостатков. Настоящая работа посвящена получению линейной регрессии для величины спада сигнала анализатора атомов перезарядки (NPA).

В разд. 1 описано устройство диагностического комплекса токамака Глобус-М2, применяемого в экспериментах по наблюдению ТАЕ. В разд. 2 получена регрессия для величины потерь быстрых ионов от амплитуды возмущения и параметров плазмы. Разд. 3 посвящен влиянию альфвеновских мод на нейтронный выход.

## 1. Эксперимент на токамаке Глобус-М2

Глобус-М2 — компактный (большой радиус  $R=36$  см, малый радиус  $r = 24$  см, аспектное отношение  $A = 1.5$ ) сферический токамак [14,15], который является модернизированной версией токамака Глобус-М [15,16]. Установка Глобус-М2 оборудована двумя [17,18] инжекторами атомов высокой энергии мощностью до 1 MW и энергией инжекции до 30 и 50 keV соответственно. В состав диагностического комплекса токамака входят два анализатора атомов перезарядки (NPA): ACORD-12 и ACORD-24M [19]. Оба анализатора приспособлены для детектирования атомов как водорода, так и дейтерия, и имеют временное разрешение 0.1 ns. ACORD-12 имеет 6 спектральных каналов для регистрации атомов водорода, настраиваемых в диапазоне 250–30 keV, и 6 каналов для регистрации атомов дейтерия в диапазоне 400–20 keV. Анализатор установлен в экваториальной плоскости нормально к центральному столбу. В свою очередь, ACORD-24M имеет по 12 каналов для регистрации атомов и водорода, и дейтерия, регулируемых в

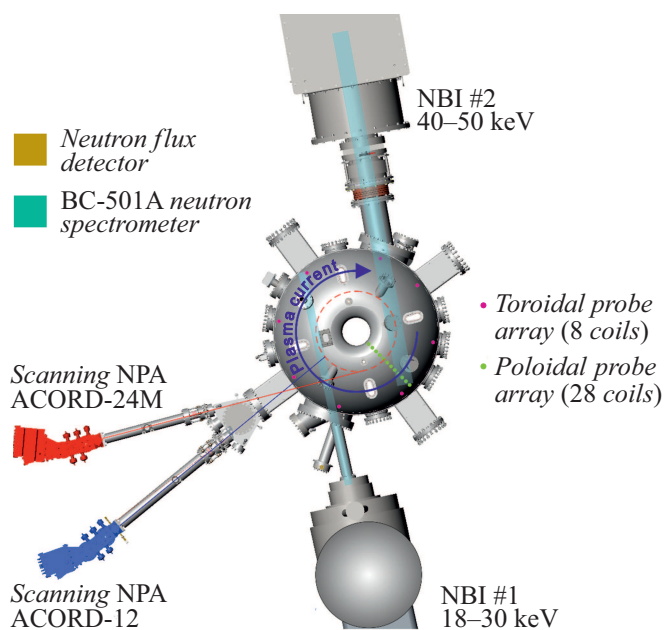


Рис. 1. Расположение инжекторов и диагностик, использованных в эксперименте.

диапазоне 250–35 keV. Этот анализатор установлен тангенциально к окружности радиуса, равного прицельному параметру первого инжектора (30 см). Поток нейтронов регистрируется при помощи  $^{10}\text{B}$  коронного счетчика, удаленного от камеры токамака на расстояние 12.7 м, и нейтронного спектрометра на основе жидкого сцинтиллятора BC-501A [20]. Для регистрации альфвеновских колебаний используется набор из 8 магнитных зондов, расположенных вдоль тороидального обхода на равных угловых расстояниях друг от друга, измеряющих радиальную компоненту магнитного потока. Схема расположения инжекторов и элементов диагностического комплекса установки Глобус-М2 показана на рис. 1.

В экспериментах на токамаке Глобус-М [9,21,22], где во время нейтральной инжекции наблюдались ТАЕ, использовался первый инжектор с энергией  $E_{NBI} = 28$  keV и мощностью  $P_{beam}$  порядка 0.85 MW, а также анализатор ACORD-24M. Анализатор ACORD-12 использовался для измерений ионной температуры [23]. Отдельные всплески ТАЕ, наблюдаемые на сигнале магнитных зондов, приводили к кратковременным просадкам в потоке нейтралей в канале, настроенном на регистрацию частиц с энергией, близкой к энергии инжекции ( $28.5 \pm 1.5$  keV). Измерения величины этих просадок производились с усреднением по окну 300  $\mu\text{s}$ . Следует отметить, что провал в потоке нейтралей в канале анализатора не свидетельствует об окончательной потере этих частиц, а лишь об их перераспределении как в физическом пространстве, так и в пространстве скоростей. Однако, поскольку такие провалы наблюдаются также и на сигнале детектора нейтронов, такое перераспределение приводит к уменьшению нейтронного выхода,

что особенно существенно для термоядерного источника нейтронов.

ТАЕ в токамаке Глобус-М регистрировались в диапазоне параметров плазмы  $\langle n_e \rangle < 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ,  $I_p = 180\text{--}250 \text{ kA}$ ,  $B_T = 0.4\text{--}0.5 \text{ T}$  как на стадии роста тока, так и на стадии плато [9]. В токамаке Глобус-М2 были достигнуты значения магнитного поля  $B_T = 0.6\text{--}0.8 \text{ T}$  и тока по плазме до  $400 \text{ kA}$ , что позволило проанализировать зависимость потерь быстрых ионов в более широком диапазоне параметров, а ранее полученная [21,22] зависимость была дополнена [24] соответствующими точками (рис. 5 в работе [21], рис. 1.1 в работе [24]). Точки, соответствующие более высоким значениям поля и тока, как и полагалось ранее, лежат на графике ниже точек, соответствующих более низким значениям, что свидетельствует об уменьшении потерь быстрых ионов. При этом для точек, соответствующих низким значениям поля ( $0.4\text{--}0.5 \text{ T}$ ), и тока ( $0.18\text{--}0.25 \text{ kA}$ ) при больших значениях амплитуды возмущения ( $> 4 \text{ G}$ ) характер зависимости меняется, и экспериментальные точки выходят на уровень насыщения, тогда как для более высоких значений поля ( $0.6\text{--}0.8 \text{ T}$ ) и тока ( $0.3\text{--}0.4 \text{ MA}$ ) такого насыщения не происходит. Точки, относящиеся к участку насыщения, были исключены из дальнейшего анализа.

## 2. Анализ потерь быстрых ионов

Искалась регрессионная зависимость относительной величины провала в потоке NRA от амплитуды ТАЕ  $\delta B$ , тороидального поля  $B_0$  и тока по плазме  $I_p$  в виде степенной функции  $dN/N = C\delta B^\alpha B_0^\beta I_p^\gamma$ , где  $C$  — неизвестная постоянная. Величина провала в потоке нейтралей на анализатор  $dN/N = (N_1 - N_2)/N_1$ , где  $N_1$  и  $N_2$  — число отсчетов анализатора до и после провала соответственно. Поскольку с повышением магнитного поля ток в большинстве разрядов повышался пропорционально с целью сохранения МГД-устойчивости разряда, эти величины не являются независимыми и обладают большим коэффициентом корреляции Пирсона  $\rho_{\beta\gamma} = \text{cov}(B_0, I_p)/\sigma(B_0)\sigma(I_p) = 0.64$ . В установке Глобус-М2 при полях  $0.6\text{--}0.8 \text{ T}$  и токах  $0.3\text{--}0.4 \text{ MA}$  тороидальные моды стали развиваться в основном на стадии роста тока при трансформации моды из альфвеновских каскадов [25], возникающих на этой стадии разряда из-за обращения профиля  $q(r)$  вследствие скин-эффекта. Учет таких всплесков ТАЕ привел к уменьшению взаимной корреляции этих величин до  $\rho_{\beta\gamma} = 0.51$ , так как на стадии роста тока при фиксированном поле ТАЕ могут возникать в широком диапазоне токов по плазме. Однако это все равно не позволяет использовать эти величины независимо, поэтому для дальнейшего анализа использовалось произведение  $B_0 I_p$ . Также для того, чтобы было возможно сопоставление амплитуд возмущений, возникающих в установках с различным

Коэффициенты корреляции Пирсона  $\rho_{xy}$  для  $\delta B$ , магнитного поля и тока

Параметры	$\delta B$	$B$	$I_p$
$\delta B$	1	0.25	0.36
$B$	0.25	1	0.52
$I_p$	0.36	0.52	1

магнитным полем (несмотря на то, что такое сопоставление и не проводилось), использовался безразмерный параметр  $\delta B/B_0$ . Коэффициенты корреляции Пирсона для трех параметров приведены в таблице. Результирующая регрессионная зависимость искалась в виде  $dN/N = C(\delta B/B_0)^\alpha (B_0 I_p)^\beta$ .

Далее методом наименьших квадратов определялись степени  $\alpha, \beta$ , свободный параметр  $C$  и дисперсии  $\sigma_\alpha, \sigma_\beta$ . Отдельные измерения величины провалов в потоке нейтралей считались неравноточными, распределенными согласно распределению Пуассона с дисперсией  $\sigma_i$ . Минимизировалась остаточная сумма квадратов  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N g_i \left( \ln \left( \frac{dN}{N} \right)_i - \ln C - \alpha \left( \frac{\delta B}{B} \right)_i - \beta (B_0 I_p)_i \right)^2. \quad (1)$$

Для учета неравноточности измерений введены весовые коэффициенты  $g_i = \sigma^2/\sigma_i^2$ , где величина  $\sigma^2 = 1/\sum 1/\sigma_i^2$  определяется из условия нормировки коэффициентов  $g_i$  на единицу. Дисперсия отдельных измерений определялась как

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{(N_{1,i} - N_{2,i})}}{N_{1,i}}. \quad (2)$$

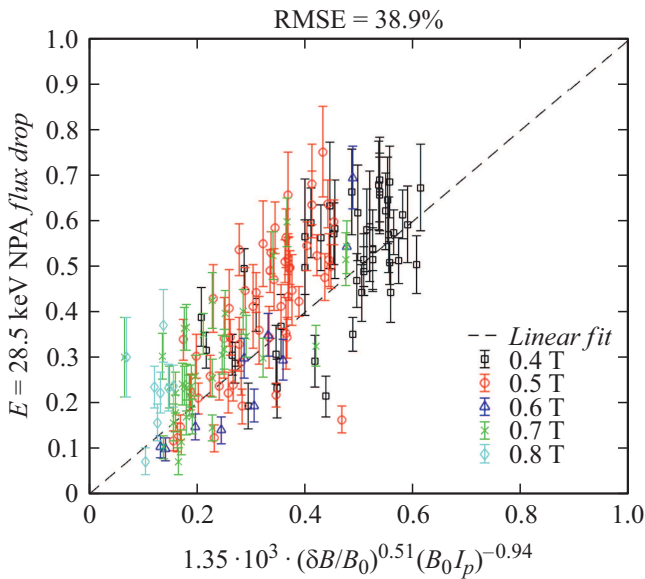
Дисперсии степеней  $\sigma_\alpha$  и  $\sigma_\beta$  определялись путем вычисления ковариационной матрицы для полученных оценок  $\bar{\alpha}$  и  $\bar{\beta}$ :

$$\begin{pmatrix} \sigma_\alpha^2 & \text{cov}(\alpha, \beta) \\ \text{cov}(\beta, \alpha) & \sigma_\beta^2 \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial \alpha^2} & \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial \alpha \partial \beta} \\ \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial \beta \partial \alpha} & \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial \beta^2} \end{pmatrix}_{\substack{\alpha=\bar{\alpha} \\ \beta=\bar{\beta}}}. \quad (3)$$

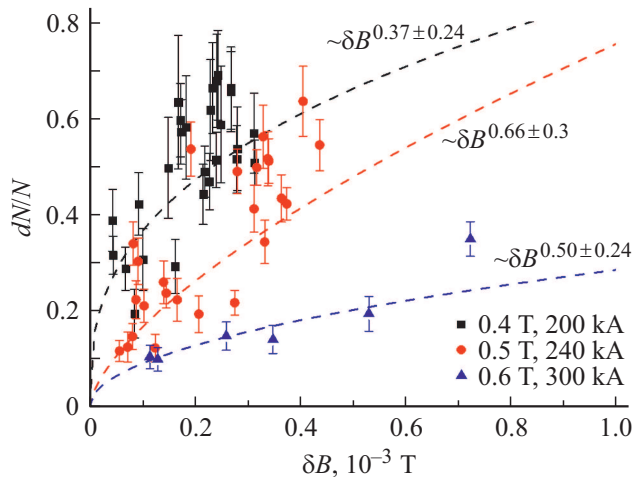
Результирующая линейная регрессия для величины провалов в потоке анализатора  $dN/N$  дается выражением

$$\frac{dN}{N} = 1.35 \cdot 10^3 \left( \frac{\delta B}{B_0} \right)^{0.51 \pm 0.15} [B_0 I_p]^{-0.94 \pm 0.27}. \quad (4)$$

Указанные в показателях степеней ошибки соответствуют доверительному интервалу с заданным значением  $3\sigma$ . Также полученная регрессия представлена на рис. 2. Следует отметить, что каждый из множителей в (4) входит как отдельный составной параметр, члены которого не являются независимыми переменными, что было показано в начале этого раздела.



**Рис. 2.** Регрессионная зависимость величины провалов в потоке NRA от относительной амплитуды TAE и произведения магнитного поля на ток по плазме.



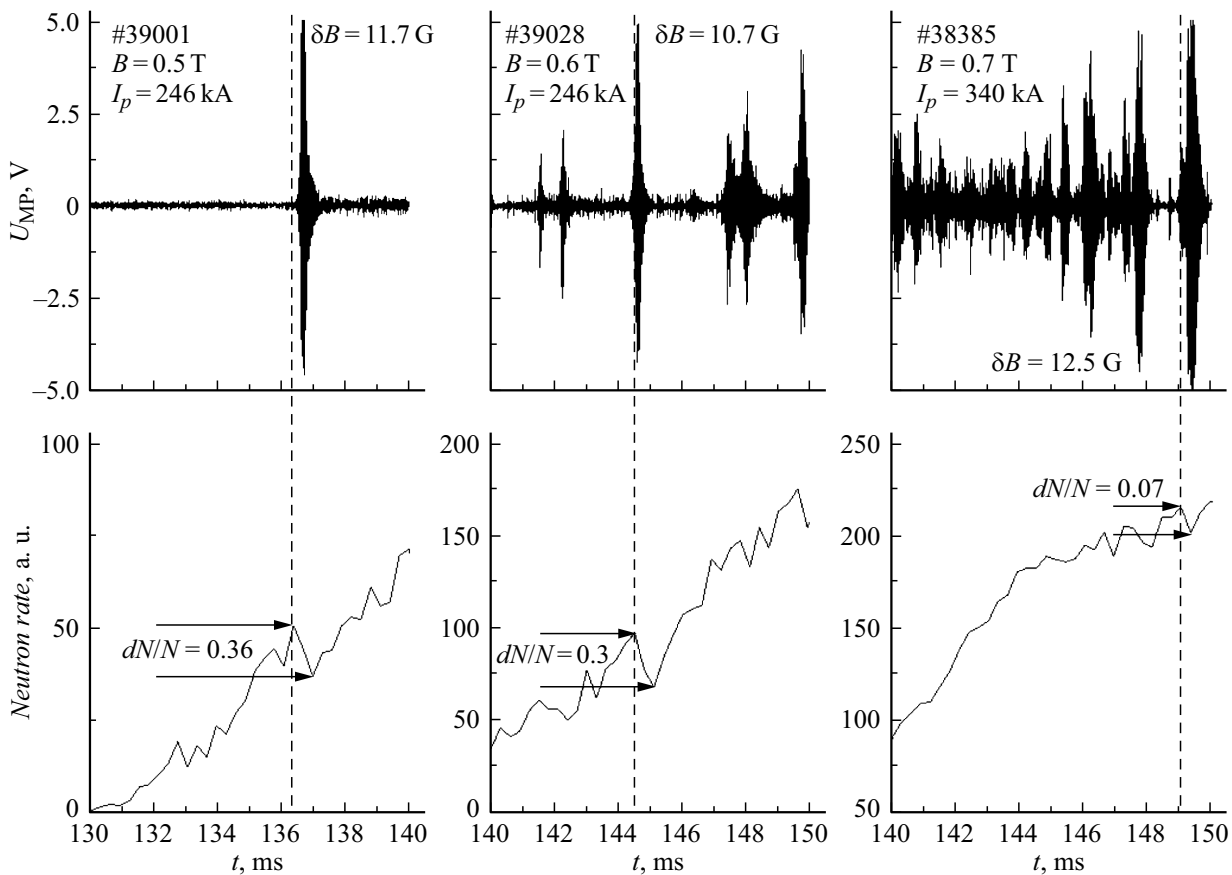
**Рис. 3.** Зависимость величины провалов в потоке NRA от амплитуды TAE для разных значений магнитного поля и тока при одинаковом запасе устойчивости.

Однако, поскольку корреляция между величинами  $\delta B$  и  $B_0$  невысока (см. таблицу), аналогичным образом отдельно определялась зависимость величины  $dN/N$  от неприведенной амплитуды  $\delta B$  при фиксированных значениях магнитного поля и тока для трех групп точек из представленных на рис. 2:  $0.4 \pm 0.02$  Т и  $200 \pm 20$  кА,  $0.5 \pm 0.02$  Т и  $240 \pm 20$  кА,  $0.6 \pm 0.02$  Т и  $300 \pm 20$  кА. Для больших значений поля и тока TAE с большими амплитудами по всей видимости не возбуждается, поэтому данные для полей 0.7–0.8 Т и токов до 400 кА не были использованы для анализа. Показатели степеней для зависимостей (рис. 3) величины провалов от  $\delta B$  попадают в доверительный интервал

определения показателя степени  $\alpha$ , в которой величина  $\delta B/B_0$  входит в выражение (4). Из этого можно сделать вывод, что степень зависимости величины провалов  $dN/N$  от амплитуды  $\delta B$  порядка 0.5, а зависимость от магнитного поля слабая. Тогда степень  $\beta = -0.94$ , в которой величина  $B_0 I_p$  (т.е. ток по плазме, если не учитывать слабую зависимость от магнитного поля) входит в выражение (4), свидетельствует о том, что потери быстрых ионов обусловлены преимущественно смещением траектории пролетных частиц вдоль большого радиуса. Смещение траектории пролетной частицы от магнитной поверхности (в дрейфовом приближении) можно оценить как  $d = R - R_c \sim q \rho_{ci} \sim 1/I_p$ , где  $R$  — положение центра орбиты пролетной частицы по большому радиусу,  $R_c$  — радиус магнитной поверхности, где произошла ионизация,  $\rho_{ci}$  — ионный ларморовский радиус,  $q = q_{cyl}$  — коэффициент запаса устойчивости в цилиндрическом приближении. Таким образом, по полученной в (4) регрессии можно сделать вывод о том, что уменьшение потерь быстрых ионов обусловлено преимущественно увеличением тока по плазме, что подтверждает предположение, выдвинутое ранее в работе [9].

### 3. Влияние альфвеновских мод на нейтронный выход

В разрядах с альфвеновскими модами наблюдались не только просадки в сигнале анализатора атомов перезарядки, но и непосредственное уменьшение нейтронного выхода во время вспышек. На токамаке Глобус-М2 недавно были достигнуты значения магнитного поля до 0.85 Т и тока по плазме до 400 кА. Это увеличение тока по плазме и магнитного поля также повлияло и на нейтронный выход. Ранее для токамака Глобус-М была получена [22] зависимость числа зарегистрированных нейтронов от амплитуды TAE для поля 0.4 Т и токов 180–230 кА по данным пропорционального счетчика нейтронов, заполненного  ${}^3\text{He}$ , ранее использовавшегося на установке Глобус-М. В связи с тем что диагностика нейтронов была усовершенствована (вместо пропорционального счетчика используется коронный счетчик и нейтронный спектрометр), сравнение ранее полученных данных с новыми оказывается затруднительно. Однако в экспериментах на установке Глобус-М2 при поле 0.5 Т токе 200–250 кА также регистрировались тороидальные моды, возбуждение которых приводило к кратковременному снижению уровня сигнала нейтронного детектора. На рис. 4 представлены осциллограммы сигналов магнитных зондов (сверху) и зависимости числа отсчетов нейтронного спектрометра от времени во всем диапазоне энергий (снизу) для трех разрядов: #39001 (0.5 Т, 209 кА), #39027 (0.6 Т, 246 кА), #38385 (0.7 Т, 340 кА), в которых регистрировались вспышки TAE примерно одинаковой амплитуды (порядка 10 Г). Если для первых двух разрядов относительная величина про-



**Рис. 4.** Провалы в потоке нейтронов (снизу), вызываемые вспышками ТАЕ близкой амплитуды для разрядов с разными значениями магнитного поля и тока. Слева направо: разряд #39001 (0.5 Т, 209 кА), разряд #39028 (0.6 Т, 246 кА) и разряд #38385 (0.7 Т, 340 кА).

вала составляет около 30%, то для разряда #38385 эта величина порядка 7%. Такие провалы оказываются слабо различимы на фоне флуктуаций сигнала нейтронного детектора, что накладывает ограничения на использование нейтронной диагностики для анализа потерь быстрых ионов, связанных с распространением ТАЕ.

#### 4. Результаты и заключение

В настоящей работе был проанализирован характер зависимости потерь быстрых ионов от амплитуды тороидальных альфвеновских мод и параметров плазмы. Ввиду сильной корреляции магнитного поля и тока получена регрессионная зависимость от относительной амплитуды ТАЕ ( $\delta B/B_0$ ) и произведения  $B_0 I_p$ . Показано, что степень зависимости от величины  $\delta B/B_0 \sim 0.5$  и порядка  $\sim -1$  от величины  $B_0 I_p$ , а зависимость от  $B_0$  более слабая, чем от  $\delta B$  и от тока. При этом разделить зависимость от магнитного поля и от тока затруднительно, так как большинство разрядов установки Глобус-М при низких значениях поля и тока производились с сохранением запаса устойчивости, что привело к высокому значению корреляции этих величин. Однако полностью пренебречь зависимостью от магнитного поля также не

получается, поскольку приведенная оценка для смещения орбиты получена в приближении малого аспектного отношения и, разумеется, в полной мере не отражает изменение траекторий орбит в сферическом токамаке. Тем не менее полученный результат указывает на то, что основной причиной снижения потерь в установке Глобус-М2 по сравнению с установкой Глобус-М может являться уменьшение величины смещения орбит пролетных частиц от магнитных поверхностей вдоль большого радиуса с ростом тока по плазме, как это и происходит в классических токамаках. Поэтому возмущения с такой же амплитудой более не приводят к потерям частиц из-за перехода на орбиты, где они не удерживаются.

Для того чтобы разделить влияние тока по плазме и тороидального магнитного поля на потери быстрых ионов, на токамаке Глобус-М2 запланирована серия экспериментов по наблюдению ТАЕ со сканированием в широком диапазоне магнитных полей и токов.

Дальнейший анализ потерь методом, описанным в настоящей работе, при более высоких значениях поля и тока (планируется увеличения магнитного поля до 1 Т и тока до 0.5 МА) может оказаться затруднительным, так как, во-первых, уже при значениях 0.7 Т, 300 кА ТАЕ не приводят к сколь-либо заметным потерям (наиболее хорошо это видно на сигнале нейтронного спектро-

метра — рис. 4), а во-вторых, наблюдается изменение характера развития самих ТАЕ. В токамаке Глобус-М2 ТАЕ развиваются в соответствии с моделью хищник-жертва [9]: большие коэффициенты нарастания вызывают стремительный рост амплитуды колебания, что вызывает перераспределение частиц, и, в свою очередь, быстрое затухание. При таком сценарии относительно легко идентифицировать просадки сигнала анализатора атомов перезарядки. При больших значениях тока по плазме смещение траекторий пролетных частиц к центру плазменного шнура больше, и возбуждение ТАЕ не приводит к изменению характера траекторий. Вследствие этого время жизни отдельных реализаций ТАЕ увеличивается, их амплитуда уменьшается, и отчетливых просадок как на сигнале нейтрального анализатора, так и в потоке нейтронов не наблюдается. Достаточно большое значение среднеквадратического отклонения (38%) может говорить о том, что присутствуют скрытые зависимости от иных параметров плазмы, а также от предшествующих событий, приводивших к перераспределению частиц в фазовом пространстве.

### Финансирование работы

Исследование потерь быстрых ионов в разд. 2 выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-12-01177-П). Измерение потока нейтронов, описанные в разд. 3 выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания по проекту № 0034-2021-0001. Измерения основных параметров плазмы были проведены на уникальной научной установке „Сферический токамак Глобус-М“, входящей в состав Федерального центра коллективного пользования „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (проект RFMEFI62119X0021) в рамках государственного задания по проекту № 0040-2019-0023 в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] W.W. Heidbrink. *Phys. Plasmas*, **15**, 055501 (2008). DOI: 10.1063/1.2838239
- [2] K.-L. Wong. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **41**, R1 (1999). DOI: 10.1088/0741-3335/41/1/001
- [3] ITER Physics Expert Group on Energetic Particles, Heating and Current Drive and ITER Physics Basis Editors, *Nucl. Fusion*, **39**, 2471 (1999). DOI: 10.1088/0029-5515/39/12/305
- [4] S.E. Sharapov, M. Garcia-Munoz, M.A. Van Zeeland, B. Bobkov, I.G.J. Classen, J. Ferreira, A. Figueiredo, M. Fitzgerald, J. Galdon-Quiroga, D. Gallart, B. Geiger, J. Gonzalez-Martin, T. Johnson, P. Lauber, M. Mantsinen, F. Nabais, V. Nikolaeva, M. Rodriguez-Ramos, L. Sanchis-Sanchez, P.A. Schneider, A. Snicker, P. Vallejos and the AUG Team and the EUROfusion MST1 Team. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **60**, 014026 (2018). DOI: 10.1088/1361-6587/aa90ee
- [5] M.P. Gryaznevich, S.E. Sharapov. *Plasma Phys. Controlled. Fusion*, **46**, S15 (2004). DOI: 10.1088/0741-3335/46/7/S02
- [6] E.D. Fredrickson, C.Z. Cheng, D. Darrow, G. Fu, N.N. Gorelenkov, G. Kramer, S.S. Medley, J. Menard, L. Roquemore, D. Stutman, R.B. White. *Phys. Plasmas*, **16**, 2852 (2003). DOI: 10.1063/1.1579493
- [7] M.P. Gryaznevich, S.E. Sharapov. *Nucl. Fusion*, **40**, 907 (2000). DOI: 10.1088/0029-5515/40/5/303
- [8] В.В. Буланин, В.К. Гусев, Г.С. Курский, В.Б. Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, М.А. Петров, Ю.В. Петров, А.Ю. Тельнова, А.Ю. Яшин. *Письма в ЖТФ*, **43** (23), 40 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.23.45274.16986 [V.V. Bulanin, V.K. Gusev, G.S. Kurskiy, V.B. Minaev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, M.A. Petrov, Yu.V. Petrov, A.Yu. Tel'nova, A.Yu. Yashin. *Tech. Phys. Lett.*, **43**, 1067 (2017) DOI: 10.1134/S1063785017120033]
- [9] Ю.В. Петров, Н.Н. Бахарев, В.В. Буланин, В.К. Гусев, Г.С. Курский, А.А. Мартынов, С.Ю. Медведев, В.Б. Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, Н.В. Сахаров, П.Б. Щеголев, А.Ю. Тельнова, С.Ю. Толстяков, А.Ю. Яшин. *Физика плазмы*, **45** (8), 675 (2019). DOI: 10.1134/S0367292119080080 [Yu.V. Petrov, N.N. Bakharev, V.V. Bulanin, V.K. Gusev, G.S. Kurskiy, A.A. Martynov, S.Yu. Medvedev, V.B. Minaev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, A.Yu. Telnova, S.Yu. Tolstyakov, A.Yu. Yashin. *Plasma Phys. Rep.*, **25**, 723 (2019) DOI: 10.1134/S1063780X19080075]
- [10] N.F. Cramer. *The Physics of Alfvén Waves* (WILEY-VCH Verlag, Berlin, 2001), p. 201–204.
- [11] E.D. Fredrickson, N.A. Crocker, D.S. Darrow, N.N. Gorelenkov, G.J. Kramer, S. Kubota, M. Podesta, R.B. White, A. Bortolon, S.P. Gerhardt, R.E. Bell, A. Diallo, B. LeBlanc, F.M. Levinton, H. Yuh. *Nucl. Fusion*, **53**, 013006 (2013). DOI: 10.1088/0029-5515/53/1/013006
- [12] O.M. Jones, M. Cecconello, K.G. McClements, I. Klimek, R.J. Akers, W.U. Boeglin, D.L. Keeling, A.J. Meakins, R.V. Perez, S.E. Sharapov, M. Turnyanskiy and the MAST team. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **57**, 125009 (2015). DOI: 10.1088/0741-3335/57/12/125009
- [13] E. Hirvijoki, A. Snicker, T. Korpilo, P. Lauber, E. Poli, M. Schneller, T. Kurki-Suonio. *Comp. Phys. Communications*, **183**, 2589 (2012). DOI: 10.1016/j.cpc.2012.07.009
- [14] V.B. Minaev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, V.I. Varfolomeev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, E.N. Bondarchuk, P.N. Brunkov, F.V. Chernyshev, V.I. Davydenko, V.V. Dyachenko, A.A. Kavin, S.A. Khitrov, N.A. Khromov, E.O. Kiselev. *Nucl. Fusion*, **57**, 066047 (2017). DOI: 10.1088/1741-4326/aa69e0
- [15] V.K. Gusev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, B.Ya. Ber, E.N. Bondarchuk, V.V. Bulanin, A.S. Bykov, F.V. Chernyshev, E.V. Demina, V.V. Dyachenko, P.R. Goncharov, A.E. Gorodetsky, E.Z. Gusakov, A.D. Ibyaminova, A.A. Ivanov. *Nucl. Fusion*, **55**, 104016 (2015). DOI: 10.1088/0029-5515/55/10/104016
- [16] В.К. Гусев, В.Е. Голант, Е.З. Гусаков, В.В. Дьяченко, М.А. Ирзак, В.Б. Минаев, Е.Е. Мухин, А.Н. Новохацкий, К.А. Подушникова, Г.Т. Раздобарин, Н.В. Сахаров, Е.Н. Третьубова, В.С. Узлов, О.Н. Щербинин,



- В.А. Беляков, А.А. Кавин, Ю.А. Косцов, Е.Г. Кузьмин, В.Ф. Соикин, Е.А. Кузнецов, В.А. Ягнов. *ЖТФ*, **69** (9), 58 (1999). [V.K. Gusev, V.E. Golant, E.Z. Gusakov, V.V. D'yachenko, M.A. Irzak, V.B. Minaev, E.E. Mukhin, A.N. Novokhatskii, K.A. Podushnikova, G.T. Razdobarin, N.V. Sakharov, E.N. Tregubova, V.S. Uzlov, O.N. Shcherbinin, V.A. Belyakov, A.A. Kavin, Yu.A. Kostsov, E.G. Kuz'min, V.F. Soikin, E.A. Kuznetsov, V.A. Yagnov. *Tech. Phys.*, **44**, 1054 (1999). DOI: 10.1134/1.1259469]
- [17] В.К. Гусев, А.В. Деч, Л.А. Есипов, В.Б. Минаев, А.Г. Барсуков, Г.Б. Игонькина, В.В. Кузнецов, А.А. Панасенков, М.М. Соколов, Г.Н. Тилинин, А.В. Лупин, В.К. Марков. *ЖТФ*, **77** (9), 28 (2007). [V.K. Gusev, A.V. Dech, L.A. Esipov, V.B. Minaev, A.G. Barsukov, G.B. Igon'kina, V.V. Kuznetsov, A.A. Panasenkov, M.M. Sokolov, G.N. Tilinin, A.V. Lupin, V.K. Markov. *Tech. Phys.*, **52**, 1127 (2007) DOI: 10.1134/S1063784207090058]
- [18] А.Ю. Телнова, В.В. Минаев, Р.В. ШчегOLEV, Н.Н. Бакхареv, I.V. Shikhovtsev, V.I. Varfolomeev. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1400**, 077015 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077015
- [19] N.N. Bakharev, F.V. Chernyshev, P.R. Goncharov, V.K. Gusev, A.D. Ibyaminova, V.A. Kornev, G.S. Kurskiev, A.D. Melnik, V.B. Minaev, M.I. Mironov, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, S.Yu. Tolstyakov. *Nucl. Fusion*, **55**, 043023 (2015). DOI: 10.1088/0029-5515/55/4/043023
- [20] M.V. Iliasova, A.E. Shevelev, E.M. Khilkevitch, I.N. Chugunov, V.B. Minaev, D.B. Gin, D.N. Doinikov, I.A. Polunovsky, V.O. Naidenov, M.A. Kozlovskiy, M.F. Kudoyarov. *Nucl. Instr. and Methods in Phys. Research, Section A*, **983**, 164590 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2020.164590
- [21] Н.Н. Бахарев, И.М. Балаченков, В.И. Варфоломеев, А.В. Воронин, В.К. Гусев, В.В. Дьяченко, М.В. Ильясова, Е.О. Киселев, А.Н. Коновалов, Г.С. Курский, А.Д. Мельник, В.Б. Минаев, И.В. Мирошников, А.Н. Новохацкий, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, О.М. Скрекель, А.Ю. Тельнова, В.А. Токарев, С.Ю. Толстяков, Е.А. Тухменева, Е.М. Хилькевич, Н.А. Хромов, Ф.В. Чернышев, И.Н. Чугунов, А.Е. Шевелев, П.Б. Щеголев. *Физика плазмы*, **46** (7), 579 (2020). DOI: 10.31857/S036729212007001X [N.N. Bakharev, I.M. Balachenkov, F.V. Chernyshev, I.N. Chugunov, V.V. Dyachenko, V.K. Gusev, M.V. Iliasova, E.M. Khilkevitch, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, A.N. Konovalov, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, A.D. Melnik, I.V. Miroshnikov, A.N. Novokhatsky, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, A.E. Shevelev, O.M. Skrekel, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.A. Tukhmeneva, V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin. *Plasma Phys. Rep.*, **46**, 675 (2020). DOI: 10.1134/S1063780X20070016]
- [22] Yu.V. Petrov, N.N. Bakharev, V.K. Gusev, V.B. Minaev, V.A. Kornev, G.S. Kurskiev, M.I. Patrov, N.V. Sakharov, S.Yu. Tolstyakov, P.B. Shchegolev. *J. Plasma Phys.*, **81**, 515810601 (2015). DOI: 10.1017/S0022377815001129
- [23] N.N. Bakharev, F.V. Chernyshev, V.K. Gusev, E.O. Kiselev, G.S. Kurskiev, M.M. Larionova, A.D. Melnik, V.B. Minaev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, O.M. Skrekel, A.Yu. Telnova, E.A. Tukhmeneva, V.I. Varfolomeev. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **62**, 125010 (2020). DOI: 10.1088/1361-6587/abbe32
- [24] I.M. Balachenkov, Yu.V. Petrov, V.K. Gusev, N.N. Bakharev, V.V. Bulanin, V.I. Varfolomeev, V.V. Dyachenko, N.S. Zhiltsov, E.O. Kiselev, A.N. Konovalov, S.V. Krikunov, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, N.V. Sakharov, A.Yu. Telnova, P.B. Shchegolev, A.Yu. Yashin. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1697**, 012212 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012212
- [25] И.М. Балаченков, Ю.В. Петров, В.К. Гусев, Н.Н. Бахарев, В.В. Буланин, В.И. Варфоломеев, Н.С. Жильцов, Е.О. Киселев, Г.С. Курский, В.Б. Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, А.М. Пономаренко, Н.В. Сахаров, А.Ю. Тельнова, В.А. Токарев, Н.А. Хромов, П.Б. Щеголев, А.Ю. Яшин. *Письма в ЖТФ*, **46** (23), 3 (2020). DOI: 10.21883/PJTf.2020.23.50338.18450 [I.M. Balachenkov, Yu.V. Petrov, V.K. Gusev, N.N. Bakharev, V.V. Bulanin, V.I. Varfolomeev, N.S. Zhil'tsov, E.O. Kiselev, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, N.V. Sakharov, A.Yu. Tel'nova, V.A. Tokarev, N.A. Khromov, P.B. Shchegolev, A.Yu. Yashin. *Tech. Phys. Lett.*, **46**, 1157 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020120032