

04

## Исследование влияния тока плазмы на ионный теплоперенос в сферическом токамаке Глобус-М

© А.Ю. Тельнова<sup>1</sup>, Г.С. Курскиев<sup>1</sup>, И.В. Мирошников<sup>1</sup>,  
Г.Ф. Авдеева<sup>2</sup>, Н.Н. Бахарев<sup>1</sup>, В.К. Гусев<sup>1</sup>, В.Б. Минаев<sup>1</sup>,  
А.Д. Мельник<sup>1</sup>, Ю.В. Петров<sup>1</sup>, Н.В. Сахаров<sup>1</sup>,  
Ф.В. Чернышев<sup>1</sup>, П.Б. Щёголев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark  
E-mail: anna.telnova@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 12 апреля 2018 г.

На сферическом токамаке Глобус-М проведена серия экспериментов по исследованию зависимости температуры ионов от тока плазмы. Измерения ионной температуры проводились в нескольких пространственных точках с помощью диагностики спектроскопии перезарядки и анализатора атомов перезарядки. На основе экспериментальных данных выполнено моделирование с использованием численного кода ASTRA, определены коэффициенты температуропроводности для ионного компонента плазмы. Результаты расчетов свидетельствуют о характере поведения ионов, близком к неоклассическому.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.15.46447.17330

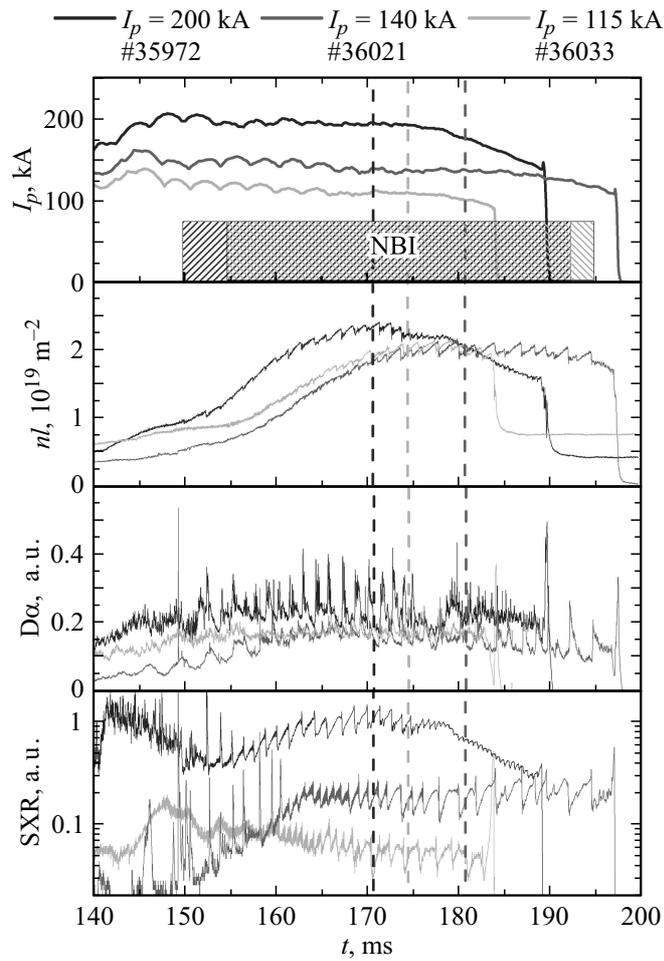
В ряде экспериментов на сферических токамаках было обнаружено, что после перехода в режим улучшенного удержания появляется возможность описывать поведение ионов в рамках неоклассической теории [1,2]. На сферическом токамаке Глобус-М [3] поведение ионов также предполагается неоклассическим [4]. В связи с реконструкцией токамака Глобус-М [5] и повышением тороидального магнитного поля и тока плазмы ожидается снижение столкновительности, которое в свою очередь может привести к усилению аномальной составляющей в ионном компоненте плазмы [6]. Задача настоящей работы — оценить влияние тока плазмы на нагрев ионов и исследовать влияние аномальной составляющей в ионном компоненте плазмы при повышении

тока плазмы. Для исследования влияния увеличения тока плазмы на теплоперенос ионов была проведена серия экспериментов по измерению ионной температуры в центре шнура с помощью спектроскопии перезарядки (CXRS) и с помощью анализатора атомов перезарядки АКОРД-12 (NPA) [7].

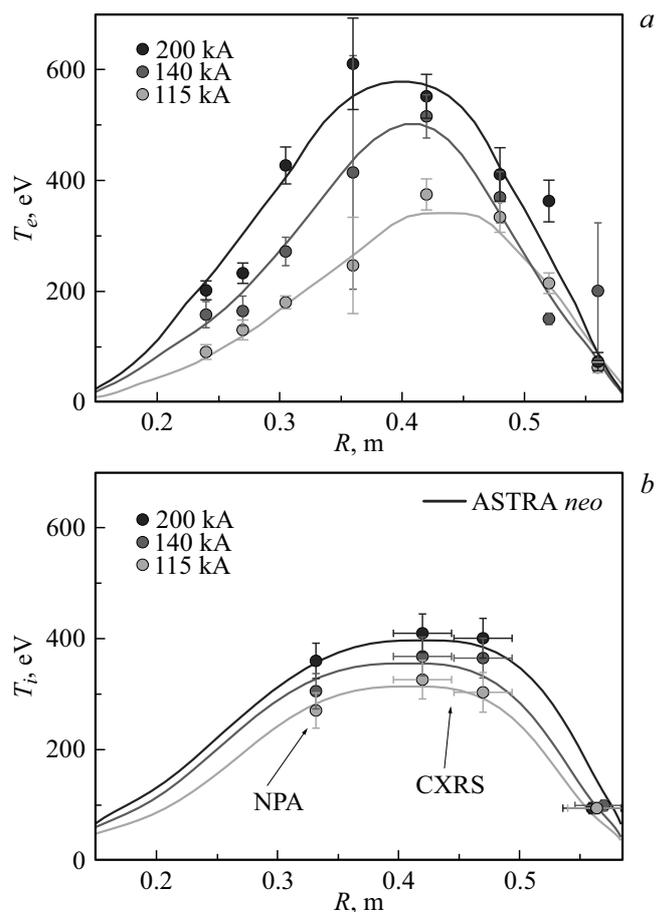
Исследование проводилось в дейтериевой плазме в диверторной магнитной конфигурации с нижней  $X$ -точкой при вытянутости шнура 1.7 и треугольности 0.35. Ток плазмы варьировался в пределах от 115 до 200 кА, все остальные параметры поддерживались неизменными: тороидальное магнитное поле 0.4 Т, среднехордовая плотность электронов  $\sim 3.6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , газ пучка атомов — дейтерий, энергия частиц пучка 26 кеВ, мощность 0.35 MW, поперечные размеры (на уровне  $e^{-1}$ )  $2 \times 8 \text{ см}$ . На рис. 1 представлены ток плазмы, среднехордовая плотность, интенсивность линии светимости  $D\alpha$ , сигнал обзорного детектора мягкого рентгеновского излучения и момент включения инжекции для всех трех разрядов. Штриховой линией соответствующего оттенка обозначены моменты времени, выбранные для моделирования.

Измерения электронной температуры и плотности осуществлялись с помощью диагностики томсоновского рассеяния [8]. Измерения ионной температуры с помощью CXRS проводились по двум хордам наблюдения в экваториальной плоскости установки, пересекавшим инжектированный атомный пучок вблизи оси плазменного шнура при  $R = 42$  и  $47 \text{ см}$  (где  $R$  — координата большого радиуса токамака) под углом  $\sim 80^\circ$  к магнитной поверхности. Линии наблюдения представляли собой конусы с углом раствора  $\sim 6^\circ$ . Значения ионной температуры на границе шнура (55–57 см) получены на основе анализа пассивного сигнала CXRS, обусловленного излучением ионов  $\text{C}^{5+}$  из периферийной области плазменного шнура вблизи сепаратрисы. Область локализации ионов  $\text{C}^{5+}$  является достаточно узкой, максимум концентрации расположен в области электронных температур порядка 100 эВ [9]. Измерения с помощью NPA проводились в течение всего разряда. По результатам моделирования с помощью кода DOUBLE [10,11] значения ионной температуры, полученные с использованием анализатора атомов перезарядки, в случае, когда хорда наблюдения NPA пересекает пучок NBI, должны быть отнесены к области их пересечения, т. е. в нашем случае к  $R = 32 \text{ см}$ .

Полученные экспериментальные профили электронной и ионной температуры, соответствующие квазистационарной фазе разряда (см.



**Рис. 1.** Осциллограммы основных сигналов: ток плазмы ( $I_p$ ), среднехордовая плотность электронов ( $n_l$ ), интенсивность линии светимости  $D\alpha$ , интенсивность мягкого рентгеновского излучения (SXR). Штриховыми линиями обозначены моменты времени, выбранные для моделирования. Показаны моменты старта нейтральной инжекции (NBI).



**Рис. 2.** Пространственные распределения кинетических параметров плазмы для режимов с током плазмы 115, 140 и 200 кА. *a* — электронная температура, *b* — ионная температура. Точки соответствуют экспериментальным значениям, кривые получены методом численного моделирования.

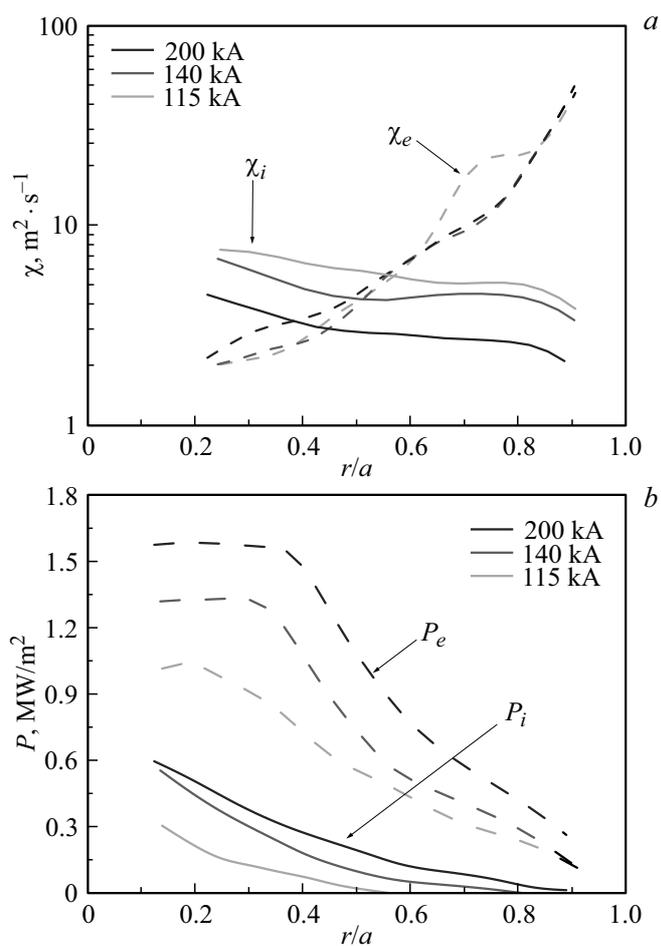
рис. 1, штриховая линия), представлены на рис. 2, *a, b*. Видно, что при повышении тока плазмы растет электронная температура. Также увеличение тока ведет к росту температуры ионов. На основе получен-

ных экспериментальных профилей ионной температуры проводилось моделирование с помощью кода ASTRA [12]. При моделировании для ионного компонента плазмы решалась прямая транспортная задача: коэффициенты температуропроводности выбирались исходя из предположения о неоклассическом поведении ионов в плазме и рассчитывались с помощью блока NCLASS [13]. На основании этих расчетов строился профиль ионной температуры, который сравнивался с экспериментальными измерениями (рис. 2, *b*). Для электронного компонента плазмы решалась обратная транспортная задача: на основании измеренных температуры и плотности рассчитывались коэффициенты температуропроводности, представленные на рис. 3, *a*.

В качестве граничного условия для решения уравнения равновесия задавались параметры последней замкнутой магнитной поверхности, полученные с помощью кода EFIT [14]. Эффективный заряд плазмы подбирался таким образом, чтобы расчетное напряжение на обходе совпадало с измеренным экспериментально, а распределение эффективного заряда считалось постоянным вдоль радиуса и для всех рассматриваемых разрядов составляло 2.7. Основной примесью считался углерод. Поглощенная мощность пучка рассчитывалась блоком NBI [15]. При этом делались поправки на потери быстрых частиц, рассчитанные с помощью модернизированного кода [11].

В основе данного кода лежит решение уравнения движения ионов в магнитном и электрическом полях с учетом гофрировки магнитного поля для определения прямых потерь и кинетического уравнения Больцмана с учетом диффузии по скоростям и углового рассеяния для учета потерь при замедлении.

Рассчитанные профили ионной температуры (рис. 2, *b*) хорошо согласуются с экспериментальными данными. Это указывает на то, что перенос тепла в ионном канале можно описывать с помощью неоклассической теории. Соответствующие им коэффициенты температуропроводности представлены на рис. 3, *a*. Видно, что при повышении тока плазмы температуропроводность ионов снижается, а температуропроводность электронов (рис. 3, *a*) существенно не меняется, но превышает неоклассическую более чем на порядок. Эти результаты согласуются с полученными при исследованиях теплопереноса в зависимости от тока плазмы на токамаке NSTX [1]. В ходе моделирования были получены данные об энергии, запасенной в электронном и ионном компонентах плазмы, мощности омического нагрева и мощности от нейтрального



**Рис. 3.** *a* — коэффициенты температуропроводности для ионов, рассчитанные с помощью кода NCLASS (сплошные линии), эффективные коэффициенты температуропроводности для электронов, полученные при решении обратной задачи (штриховые линии); *b* — плотность мощности нагрева электронного и ионного компонентов плазмы; *c* — тепловые потоки в электронном и ионном каналах.

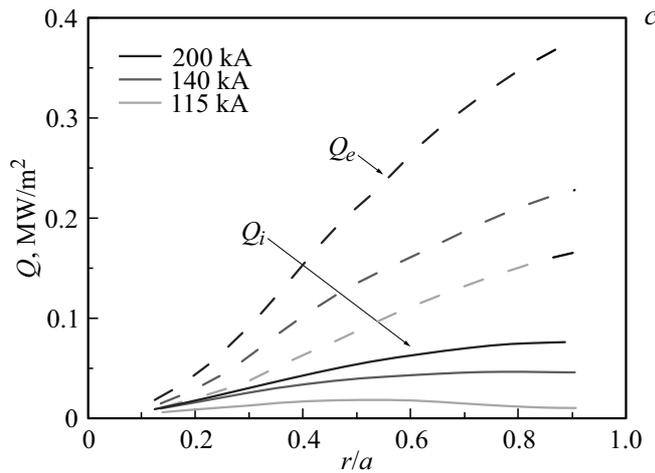


Рис. 3 (продолжение).

пучка поглощенной электронами и ионами плазмы. Результаты расчетов приведены в таблице.

Моделирование показало, что с ростом тока плазмы возрастает энергия, запасенная в плазме, причем на электронный компонент приходится около 2/3 изменения энергии. Это связано с тем, что возрастает мощность омического нагрева (см. таблицу), которая нагревает преимущественно электроны. Поглощенная мощность нейтрального пучка также возрастает, что связано со снижением потерь быстрых частиц при повышении тока плазмы [16]. Профили суммарной вложенной мощности нагрева для электронного и ионного компонентов плазмы приведены на рис. 3, *b*. На рис. 3, *c* представлены тепловые потоки электронов и ионов.

Таким образом, в работе продолжено исследование теплопереноса в ионном канале на основе ранее проведенных измерений ионной температуры с помощью CXRS [17]. Результаты демонстрируют, что рост тока плазмы влечет за собой увеличение электронной и ионной температур и как следствие увеличение энергии, запасенной плазмой. Также было определено, что тепловые потоки в электронном канале значительно превышают ионные и увеличиваются с ростом тока. Отсюда можно сделать вывод, что основной канал потерь — электрон-

Параметры плазмы, полученные при моделировании разрядов токамака Глобус-М с различными значениями тока плазмы

Ток плазмы кА	Тепловая энергия плазмы, кJ		Мощность омического нагрева, MW	Мощность нагрева пучком, MW		$\tau_E$ , ms	$\tau_{E\_IPB98}$ , ms
	Электронный компонент	Ионный компонент		Электронный компонент	Ионный компонент		
115	0.581	0.345	0.24	0.022	0.023	2.7	3.8
140	0.726	0.365	0.30	0.034	0.038	2.9	4.2
200	1.07	0.622	0.42	0.068	0.060	3.1	4.5

ный. Радиационные потери в данном исследовании не учитывались. Следует отметить, что они могут оказывать значительное влияние на теплоперенос и потери электронов. Согласно результатам расчетов, с увеличением тока плазмы, как и ожидалось, возрастает время удержания энергии  $\tau_E$  (см. таблицу), что согласуется с результатами эксперимента, проведенного в режиме омического нагрева на токамаке Глобус-М [18], и результатами, полученными в экспериментах с повышенным полем [19]. При этом  $H$ -фактор [20] для всех трех режимов существенно не меняется и составляет  $\sim 0.7$ . Отсюда можно сделать вывод, что зависимость времени удержания энергии от тока плазмы на токамаке Глобус-М в режиме с дополнительным нагревом сходна со скейлингом  $IPB98(y, 2)$  ( $\tau_{E\_IPB98}$  в таблице).

Проведенное исследование зависимости ионного теплопереноса от тока плазмы показало, что при расчетах баланса энергий на сферическом токамаке Глобус-М/М2 возможно описывать поведение ионов с помощью неоклассической теории.

Моделирование процессов переноса с помощью численного кода ASTRA, а также сопутствующие расчеты поглощенной мощности пучка и удержания быстрых частиц выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-72-20076). Мониторинговые измерения основных параметров плазмы проведены в рамках госзадания с использованием оборудования Центра коллективного пользования „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.621.21.0013 от 28.08.2017 г., идентификатор проекта RFMEFI62117X0018).

## Список литературы

- [1] *Kaye S.M., Levinton F.M., Stutman D., Tritz K., Yuh H., Bell M.G., Bell R.E., Domier C.W., Gates D., Horton W., Kim J., LeBlanc B.P., Luhmann N.C., Jr, Maingi R., Mazzucato E., Menard J.E., Mikkelsen D., Mueller D., Park H., Rewoldt G., Sabbagh S.A., Smith D.R., Wang W.* // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. N 7. P. 499–509.
- [2] *Meyer H., Field A.R., Akers R.J., Brickley C., Conway N.J., Patel A., Carolan P.G., Challis C., Counsell G.F., Cunningham G., Helander P., Kirk A., Lloyd B., Maingi R., Tournianski M.R., Walsh M.J. and the MAST and NBI teams* // Plasma. Phys. Control. Fusion. 2004. V. 46. N 5A. P. A291–A298.

- [3] Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З., Дьяченко В.В., Ирзак М.А., Минаев В.Б., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Подушникова К.А., Раздобарин Г.Т., Сахаров Н.В., Трезубова Е.Н., Узлов В.С., Щербинин О.Н., Беляков В.А., Кавин А.А., Косцов Ю.А., Кузьмин Е.Г., Сойкин В.Ф., Кузнецов Е.А., Ягнов В.А. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 9. С. 58–62.
- [4] Senichenkov I.Yu., Rozhansky V.A., Bogomolov A.V., Gusev V.K., Sakharov N.V., Petrov Yu.V., Minaev V.B., Tolstyakov S.Yu., Patrov M.I., Chernyshev F.V., Ayushin B.B., Kurskiev G.S. and the Globus-M team // Proc. 35th EPS Conf on plasma physics. Hersonissos, 2008. Europhys. Conf. Abstracts. V. 32D. P. P-2.046 (1–4).
- [5] Minaev V.B., Gusev V.K., Sakharov N.V., Varfolomeev V.I., Bakharev N.N., Belyakov V.A., Bondarchuk E.N., Brunkov P.N., Chernyshev F.V., Davydenko V.I., Dyachenko V.V., Kavin A.A., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kiselev E.O., Kononov A.N., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Labusov A.N., Melnik A.D., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Rozhansky V.A., Saveliev A.N., Senichenkov I.Yu., Shchegolev P.B., Shcherbinin O.N., Shikhovtsev I.V., Sladkomedova A.D., Solokha V.V., Tanchuk V.N., Telnova A.Yu., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. N 6. P. 066047.
- [6] Kaye S.M., Gerhardt S., Gutfenfelder W., Maingi R., Bell R.E., Diallo A., LeBlanc B.P., Podesta M. // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. N 6. P. 063005.
- [7] Кисляков А.И., Петров М.П. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 7. С. 585–602.
- [8] Курские Г.С., Толстяков С.Ю., Березуцкий А.А., Гусев В.К., Кочергин М.М., Минаев В.Б., Мухин Е.Е., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Семёнов В.В., Чернаков П.В. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2012. В. 2. С. 81–88.
- [9] Wagner D. // Electron and impurity transport studies in the TCV tokamak. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2013. P. 29–35.
- [10] Afanasyev V.I., Gondhalekar A., Kislyakov A.I. // JET-R(00)04. Luxembourg, 1999. P. 20.
- [11] Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Goncharov P.R., Gusev V.K., Ibyaminova A.D., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Tolstyakov S.Yu., Zadviitskiy G.V. // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. N 4. P. 043023.
- [12] Pereverzev G.V., Yushmanov P.N. // Max-Planck IPP Report. 2002. P. 5–98.
- [13] Houlberg W.A., Shaing K.C., Hirshman S.P., Zarnstorff M.C. // Phys. Plasmas. 1997. V. 4. N 9. P. 3230–3242.
- [14] Lao L.L., John H.St., Stambaugh R.D., Kellman A.G., Pfeiffer W. // Nucl. Fusion. 1985. V. 25. N 11. P. 1611.
- [15] Polevoi A., Shirai H., Takizuka T. // JAERI-Data/Code 97-014. March 1997.

- [16] Бахареv Н.Н., Гусев В.К., Ибляминова А.Д., Корнев В.А., Курскиев Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Щёголев П.Б., Вагнер Ф. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 24. С. 22–30.
- [17] Avdeev G.F., Mirosnikov I.V., Bakharev N.N., Kurskiev G.S., Patrov M.I., Sergeev V.Yu., Shchegolev P.B. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 666. P. 012002.
- [18] Kurskiev G.S., Gusev V.K., Sakharov N.V., Bakharev N.N., Iblyaminova A.D., Shchegolev P.B., Avdeeva G.F., Kiselev E.O., Minaev V.B., Mukhin E.E., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Telnova A.Yu., Tolstyakov S.Yu. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2017. V. 59. N 4. P. 045010.
- [19] Telnova A.Yu., Minaev V.B., Shchegolev P.B., Bakharev N.N., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Petrov Yu.V., Sakharov N.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 907. P. 012014.
- [20] ITER Physics Basis // Nucl. Fusion. 1999. V. 39. N 12. P. 2175–2250.