

УДК 533.9.01

Локализация тепла в замагниченной плазме

© 2026 г. В. В. Горев^{1,2}, И. В. Ложкин^{1,2}¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, 123182, Россия² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В данной работе проведено теоретическое исследование возможности пространственно-временной локализации тепловой энергии в периферийном слое плазмы токамака ИТЕР. Основное внимание уделено возможности формирования нитевидных структур распределения температуры в замагниченной плазме, когда происходит конкуренция между двумя процессами: нелинейной теплопроводности поперек магнитного поля и объемных потерь энергии на тормозное излучение. Для решения задачи использована модель нелинейного теплопереноса, позволившая получить автомодельное аналитическое решение, описывающее эволюцию локализованного температурного профиля во времени. Установлено, что баланс между нелинейным переносом и охлаждением приводит к образованию устойчивых тепловых структур с конечным временем жизни. На примере прогнозируемых параметров периферийной плазмы ИТЕР показано, что характерный пространственный масштаб локализации составляет несколько миллиметров, а время устойчивого существования структуры – порядка десятков миллисекунд. Полученные критерии локализации и оценки пространственно-временных масштабов имеют практическую значимость для анализа теплопереноса, интерпретации диагностических данных и прогнозирования поведения плазмы в периферийной области современных и перспективных токамаков. При этом важно отметить, что речь идет именно об электронной температуре в замагниченной плазме в области SOL. Разработанная модель и предложенные расчеты могут иметь практическое значение для диагностики параметров плазмы в периферийном слое токамака ИТЕР, а также могут способствовать оптимизации режимов работы других плазменных установок.

Ключевые слова: локализация тепла, тормозное излучение, нелинейная теплопроводность, замагниченная плазма, токамак, scrape-off layer.

Введение

В замагниченной оптически прозрачной плазме с горячими электронами динамика переноса тепла определяется нелинейным коэффициентом диффузии $D_{\perp} \propto B_0^{-2} T_e^{-1/2}$ и потерями энергии горячей электронной компоненты на тормозное и магнитотормозное излучение. Далее будет показано, что в условиях, когда потери определяются тормозным излучением, в плазме возможно образование областей локализации тепла, характерный пространственный масштаб которых определяется фундаментальными константами и магнитным полем, причем охлаждение происходит за конечное время и определяется начальным энергетическим запасом. В случае охлаждения плазмы магнитотормозным излучением характерный пространственный масштаб растет со временем [1]. Задачи такого рода могут возникать, например, при исследованиях трехкомпонентных плазменных систем (горячая электронная компонента (n_e, T_e) и относительно холодная плазма (n_i, T_i)). Кроме того, актуальность задачи о локализации тепла в плазме также связана с проблемой теплового срыва в токамаках [2–5]. Отметим, что похожий класс задач – локализация тепла в средах с источником и коэффициентом теплопроводности, степенным образом зависящим от температуры, аналитически и численно исследовался в работах [6, 7].

✉ И.В. Ложкин: alfizik12@gmail.com

Поступила в редакцию: 16.12.2025

После доработки: 02.02.2026

Принята к публикации: 11.02.2026

Область SOL (Scrape-Off Layer) представляет собой периферийную зону плазмы, расположенную за последней замкнутой магнитной поверхностью (сепаратрисой) токамака ITER. В этой области открытые силовые линии магнитного поля направляют плазму к материалам первой стенки. Основная функция SOL заключается в контролируемом отводе частиц и энергии из ядерной области плазмы, где происходит термоядерная реакция. Плотность плазмы в SOL варьируется от умеренных значений у сепаратрисы до высоких величин в диверторной области, где достигает $4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и выше [2]. Температурный профиль характеризуется снижением от сотен электрон-вольт у сепаратрисы до десятков электрон-вольт в пристеночных областях [4]. В области SOL доминирующий механизм потерь конкретно на излучение и конкретно потерь тепла электронной компоненты плазмы – тормозное излучение. Такое преобладание обусловлено сочетанием высокой плотности плазмы и относительно низкой температуры по сравнению с термоядерной областью.

Методика

Рассматривается замагниченная плазма с горячими электронами, где основными процессами являются нелинейная теплопроводность, описывающая перенос тепла в поперечном направлении к магнитному полю, и тормозное излучение, характеризующее потери энергии электронов при столкновениях с ионами [1]. Цель анализа – определить эволюцию профиля температуры $T(x, t)$ в пространстве и времени. Уравнение баланса тепла имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K_{\perp}(T) \nabla T) - Q(T), \quad (1)$$

где $T(x, t)$ – температура электронов; $K_{\perp}(T)$ – коэффициент теплопроводности поперек магнитного поля; $Q(T)$ – мощность потерь энергии.

Мощность потерь энергии на тормозное излучение определяется как

$$Q(T) = \alpha \cdot T^{1/2},$$

где коэффициент α включает плотность плазмы, заряды частиц и физические константы. Рост $Q(T)$ с температурой объясняется увеличением частоты столкновений электронов с ионами и последующим излучением фотонов [8].

Для обезразмеривания уравнения (1) применим масштабные преобразования. Температура нормируется как $\tilde{T} = T / (mc^2)$, где $mc^2 \approx 0.511 \text{ МэВ}$ – энергия покоя электрона. Длина нормируется как $\tilde{x} = x / L$ с масштабом $L = (K_{\perp}^0 a_1)^{1/2} (mc^2 / T_e)^{1/2} r_{\text{He}}$, где $a_1 = 3,92 \hbar c / e^2$ – безразмерная константа; $r_{\text{He}} = c / \omega_{\text{He}}$ – ларморовский радиус; T_e – начальная температура. Время нормируется как $\tilde{t} = t / t_1$ с масштабом $t_1 = d_1 (\gamma - 1)^{-1} (mc^2 / T_e)^{3/2} \tau_{ei}$, где τ_{ei} – время между электрон-ионными столкновениями; d_1 – численный коэффициент; $\gamma = C_p / C_v$ – показатель адиабаты. В безразмерных переменных уравнение принимает универсальную форму:

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{t}} = \nabla_{\tilde{x}} \cdot (\tilde{T}^{-1/2} \nabla_{\tilde{x}} \tilde{T}) - \tilde{T}^{1/2}, \quad (2)$$

где нелинейная диффузия $\tilde{T}^{-1/2}$ конкурирует с потерями энергии $\tilde{T}^{1/2}$.

Автомодельное решение ищется в форме

$$\tilde{T}(\tilde{x}, \tilde{t}) = (\tilde{t}_0 - \tilde{t})^2 \cdot f\left(\frac{\tilde{x} - \tilde{x}_0}{(\tilde{t}_0 - \tilde{t})^n}\right),$$

что после подстановки дает:

$$\tilde{T}(\tilde{x}, \tilde{t}) = \frac{9}{16} (\tilde{t}_0 - \tilde{t})^2 \operatorname{sech}^4 \left(\frac{\tilde{x} - \tilde{x}_0}{2\sqrt{2}} \right). \quad (3)$$

Функция sech^4 описывает локализованный импульс температуры с максимумом в точке \tilde{x}_0 и шириной порядка $2\sqrt{2}$ в безразмерных единицах (что соответствует $2\sqrt{2}L$ в физических единицах). Параметр \tilde{t}_0 определяет момент времени, когда температура падает до нуля ($\tilde{T} \rightarrow 0$ при $\tilde{t} \rightarrow \tilde{t}_0$), причем $\tilde{t}_0 \propto \sqrt{E_0}$ зависит от начальной энергии.

Результаты и обсуждение

В качестве входных параметров взяты средние прогнозируемые параметры плазмы в области SOL токамака ITER, а именно: $B_0 = 5.3$ Тл, $n_e = 4 \cdot 10^{19}$ м⁻³, $T_e = 80$ эВ.

Характерный размер

$$L = (K_{\perp}^0 a_1)^{1/2} (mc^2 / T_e)^{1/2} r_{\text{He}},$$

характерное время t_0

$$\int T(x, t) dx = \frac{3\sqrt{2}}{4} L (t_0 - t)^2 = E_0 \Rightarrow t_0 = \sqrt{\frac{4E_0}{3\sqrt{2}L}}.$$

На рис. 1 показана визуализация эволюции профиля температуры при локализации тепла в замагниченной плазме в случае широкого начального профиля, а на рис. 2 – в случае узкого начального профиля. На рис. 3 видно, при каких параметрах плазмы может наблюдаться локализация тепла в целом, при

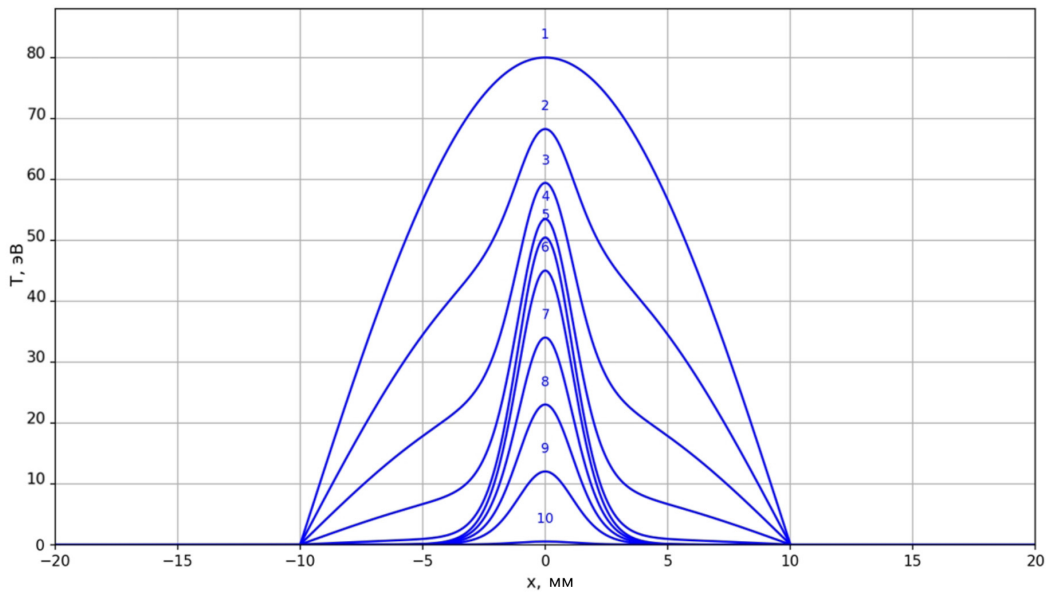


Рис. 1. Локализация тепла электронной компоненты плазмы в области SOL токамака ITER в случае широкого начального профиля температуры, кривая 1 – начальный профиль, кривая 10 – конечный профиль

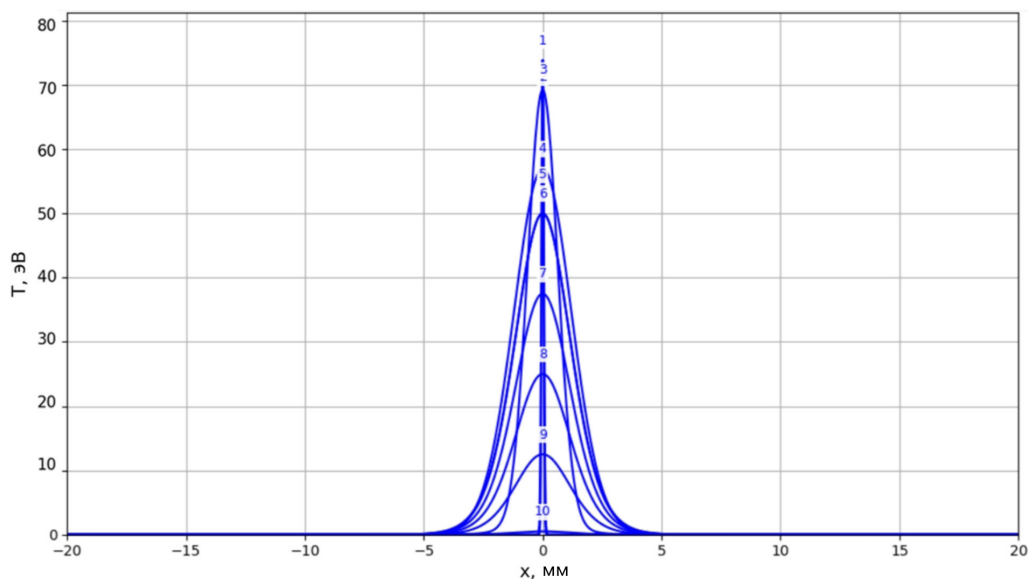


Рис. 2. Локализация тепла электронной компоненты плазмы в области SOL токамака ITER в случае узкого начального профиля температуры, кривая 1 – начальный профиль, кривая 10 – конечный профиль

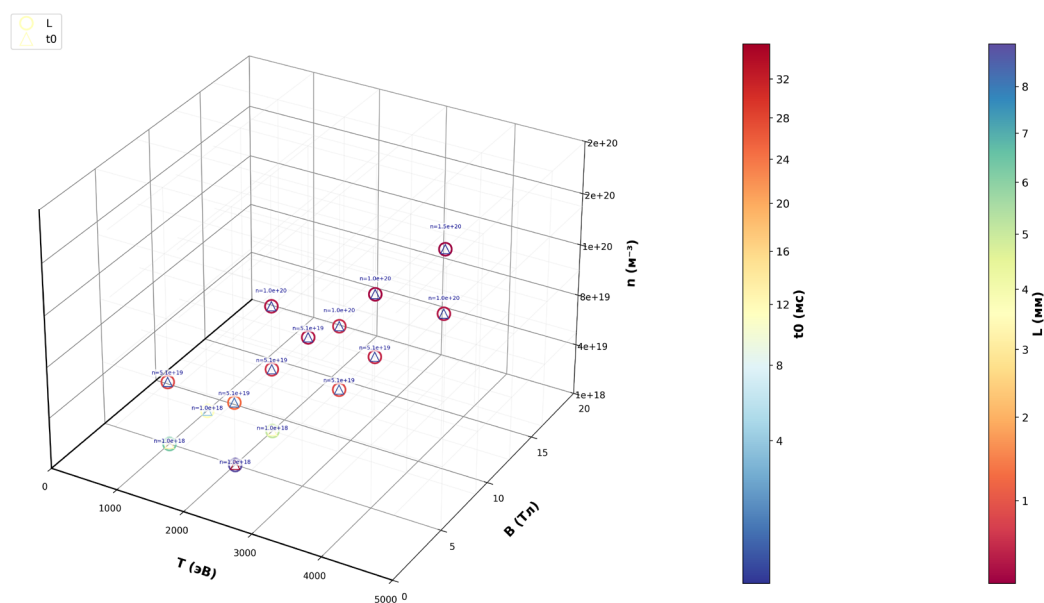


Рис. 3. Параметры плазмы, при которых может наблюдаться локализация тепла

другом магнитном поле, другой температуре и плотности плазмы. Отметим, что в плазме возникает множество структур данного типа, именно поэтому локализация тепла влияет на теплоперенос.

Выводы

В данной работе установлено, что в периферийном слое SOL электронной компоненты плазмы токамака ITER расчетный характерный размер локализации тепла может составлять несколько миллиметров, а время устойчивого существования структуры – порядка десятков миллисекунд. Пространственный масштаб отражает баланс между нелинейной теплопроводностью и потерями на тормозное излучение. Разработана модель, описывающая динамику возможного формирования и эволюции тепловых структур. Установлены критерии пространственной локализации тепла при различных параметрах плазмы.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования разработанных методов для оптимизации параметров плазмы в плазменных установках.

Финансирование

Исследование выполнено без стороннего финансирования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Вклад авторов

В.В. Горев – разработка математической модели; аналитические расчеты.

И.В. Ложкин – обработка результатов; проведение численных расчетов.

Список литературы

1. *Горев В.В., Григорьев С.Ф.* Об охлаждении высокоэнергичной электронной компоненты в замагниченной плазме // Докл. АН СССР, 1981. Т. 259. № 3. С. 573–575.
2. *Sizyuk V., Hassanein A.* Comprehensive analysis of disruption mitigation methods using gas and pellet-like injections in ITER-like Tokamaks // Scientific Reports, 2025. V. 15. art.number 32630. DOI: 10.1038/s41598-025-14407-z.
3. *Хайрутдинов Р.Р., Лукаш В.Э., Пустовитов В.Д.* Анализ электромагнитных нагрузок на вакуумную камеру при тепловом срыве в токамаке TRT // Физика плазмы, 2021. Т. 47. № 11. С. 1007–1015.
4. *Colas L., Urbanczyk G., Goniche M. et al.* The geometry of the ICRF-induced wave–SOL interaction. A multi machine experimental review in view of the ITER operation // Nuclear Fusion, 2021. V. 62. № 1. DOI 10.1088/1741-4326/ac35f9.
5. *Veselova I., Kaveeva E., Rozhansky V. et al / SOLPS-ITER drift modelling of ITER burning plasmas with narrow near-SOL heat flux channels // Nuclear Materials and Energy, 2021. V. 26. 100870. DOI 10.1016/j.nme.2020.100870.*
6. *Курдюмов С.Л., Куркина Е.С., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А.* Диссипативные структуры в неоднородной нелинейной горячей среде // Докл. АН СССР, 1980. Т. 251. С. 587–590.
7. *Курдюмов С.Л., Малинецкий Г.Г., Повещенко Ю.А., Попов Ю.П., Самарский А.А.* Взаимодействие диссипативных тепловых структур в нелинейных средах. Докл. АН СССР 1980. Т. 251. С. 836–839.
8. *Трубников Б.А., Бажанова А.Е.* Магнитное излучение слоя плазмы. В сб. «Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций». М.: Изд-во АН СССР. Т. III. 1958. С. 121–147.
9. *Кадомцев Б.Б.* Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1976. С. 238.


Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2026, vol. 15, no. 2, pp. 128–133

Heat localization in magnetized plasma

V. V. Gorev^{1,2}, I. V. Lozhkin^{1,2} 

¹National Research Center «Kurchatov Institute», sq. Academician Kurchatova, 1, Moscow, 123182, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

 alfizik12@gmail.com

Received December 16, 2025; revised February 02, 2026; accepted February 11, 2026

This paper presents a theoretical study of the possibility of spatial and temporal localization of thermal energy in the ITER tokamak's peripheral plasma layer. The focus is on the potential for the formation of filamentary temperature distribution structures in magnetized plasma, driven by competition between two processes: nonlinear thermal conductivity across the magnetic field and volumetric energy losses due to bremsstrahlung. A nonlinear heat transfer model was used to solve this problem, yielding a

self-similar analytical solution describing the temporal evolution of the localized temperature profile. It was established that the balance between nonlinear transfer and cooling leads to the formation of stable thermal structures with a finite lifetime. Using the predicted parameters of ITER's peripheral plasma as an example, it was shown that the characteristic spatial scale of localization is several millimeters, and the structure's stable existence time is on the order of tens of milliseconds. The resulting localization criteria and spatiotemporal scale assessments have practical implications for heat transfer analysis, diagnostic data interpretation, and plasma behavior prediction in the peripheral regions of current and future tokamaks. It's important to note that this study specifically addresses the electron temperature in magnetized plasma in the SOL region. The developed model and proposed calculations may be of practical value for diagnosing plasma parameters in the ITER tokamak's peripheral layer and may also contribute to the optimization of the operating modes of other plasma installations.

Keywords: heat localization, bremsstrahlung, nonlinear thermal conductivity, magnetized plasma, tokamak, scrape-off layer.

References

1. Gorev V.V., Grigoriev S.F. Ob ohlazhdenii vysokoenergichnoy elektronnoy komponenty v zamagnichennoj plazme [On cooling of the high-energy electron component in magnetized plasma]. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1981. Vol. 259. No. 3. Pp. 573–575 (in Russian).
2. Sizyuk V., Hassanein A. Comprehensive analysis of disruption mitigation methods using gas and pellet-like injections in ITER-like Tokamaks. Scientific Reports, 2025. Vol. 15. art.number 32630. DOI: 10.1038/s41598-025-14407-z.
3. Khairutdinov R.R., Lukash V.E., Pustovitov V.D. Analiz elektromagnitnyh nagruzok na vakuumnuyu kameru pri teplovom sryve v tokamake TRT [Analysis of electromagnetic loads on the vacuum chamber during a thermal quench in the TRT tokamak]. Plasma Physics, 2021. Vol. 47. No. 11. Pp. 1007–1015 (in Russian).
4. Colas L., Urbanczyk G., Goniche M. et al. The geometry of the ICRF-induced wave–SOL interaction. A multi machine experimental review in view of the ITER operation. Nuclear Fusion, 2021. Vol. 62. No. 1. DOI: 10.1088/1741-4326/ac35f9.
5. Veselova I., Kaveeva E., Rozhansky V. et al. SOLPS-ITER drift modelling of ITER burning plasmas with narrow near-SOL heat flux channels. Nuclear Materials and Energy, 2021. Vol. 26. 100870. DOI: 10.1016/j.nme.2020.100870.
6. Kurdyumov S.L., Kurkina E.S., Malinetskii G.G., Samarskii A.A. Dissipativnye struktury v neodnorodnoj nelinejnoj goryashchej srede [Dissipative structures in a non-uniform nonlinear burning medium]. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1980. Vol. 251. Pp. 587–590 (in Russian).
7. Kurdyumov S.L., Malinetskii G.G., Poveshchenko Yu.A., Popov Yu.P., Samarskii A.A. Vzaimodejstvie dissipativnyh teplovyh struktur v nelinejnyh sredah [Interaction of dissipative thermal structures in nonlinear media]. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1980. Vol. 251. Pp. 836–839 (in Russian).
8. Trubnikov B.A., Bazhanova A.Ye. Magnitnoe izluchenie sloya plazmy [Magnetic radiation of the plasma layer]. Plasma Physics and the Problem of Controlled Thermonuclear Reactions. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ. Vol. III. 1958. Pp. 121–147.
9. Kadomtsev B.B. Kollektivnye yavleniya v plazme [Collective Phenomena in Plasma]. Moscow: Nauka Publ., 1976. 238 p.