ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2022, том 86, № 7, с. 997–1000

УДК 533.9.01

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ПОТОКОМ ВНУТРИ-МАГНИТОСФЕРНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

© 2022 г. А. А. Чибранов[1, *], А. Г. Березуцкий[1], М. А. Ефимов[1], Ю. П. Захаров[1], И. Б. Мирошниченко[1], В. Г. Посух[1], М. С. Руменских[1], П. А. Трушин[1], И. Ф. Шайхисламов[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук”, Новосибирск, Россия*

**E-mail: chibranov2013@yandex.ru*

Поступила в редакцию 14.02.2022 г.
После доработки 28.02.2022 г.
Принята к публикации 23.03.2022 г.

Впервые в лабораторных условиях выполнен эксперимент по моделированию системы продольных токов в условиях плотной внутри-магнитосферной плазмы. Измерена величина и время протекания продольных токов в зависимости от магнитного поля.

DOI: 10.31857/S0367676522070122

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на огромный интерес, проявляемый сегодня к космической и астрофизической плазме, многие плазменные явления и процессы до сих пор остаются неизученными. Одним из таких процессов является формирование глобальной системы продольных токов в магнитосферах планет, в которых присутствуют плотные внутримагнитосферные потоки плазмы. Такой сценарий типичен для Юпитера, а в последнее время приобрел актуальность в связи с открытием экзопланет типа Горячих Юпитеров, магнитосферы которых характеризуются ионизацией и истечением верхней атмосферы. Продольные токи передают энергию из пограничного слоя и магнитодиска в полярную ионосферу, вызывая разнообразные эффекты. Наличие планетарной плазмы, или планетарного ветра, образованного ионизацией верхней атмосферы и удерживаемого магнитным полем планеты, с плотностью на несколько порядков величин больше плотности внешнего потока плазмы в виде звездного ветра, может привести к новым явлениям, которые в настоящий момент можно обнаружить только в лабораторном эксперименте, так как численное моделирование такой системы остается затруднительным в связи со сложной топологией.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по моделированию генерации сильных продольных токов, замыкающихся на полюсах планеты. Эксперименты проведены в лаборатории энергетики мощных лазеров ИЛФ СО РАН на установке КИ-1 [1, 2]. Отличительной особенностью опытов является применение энергичных потоков плазмы, создаваемых мощным импульсным CO_2 лазером. Ранее, в лабораторных экспериментах по обтеканию магнитного диполя лазерной плазмой [3–7] было показано, что помимо формирования четко выраженной фронтальной части магнитосферы, на полюсах внешний поток плазмы генерирует интенсивную систему продольных токов. Детальные измерения полной величины и локальной плотности продольных токов, а также магнитных возмущений на полюсах обнаружили их подобие токам зоны-1 на Земле. Лабораторные продольные токи наблюдались только в том случае, если они могли замыкаться через проводящую поверхность диполя. Новизна настоящих опытов состоит в том, что продольные токи формируются внутри-магнитосферным потоком плазмы.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Внутрь вакуумной цилиндрической камеры с размерами 5 × 1.2 м и остаточным давлением до 10^{-6} Торр помещался источник дипольного магнитного поля (рис. 1). Источник представлял собой два соленоида, последовательно подключенных к генератору напряжений с длительностью импульса ~200 мкс, каждый из которых мог создавать магнитный момент величиной до 10^6 Гс · см^3. Магнитные моменты катушек были направлены параллельно друг другу, создавая общее дипольное поле. Такая конфигурация диполя позволяла

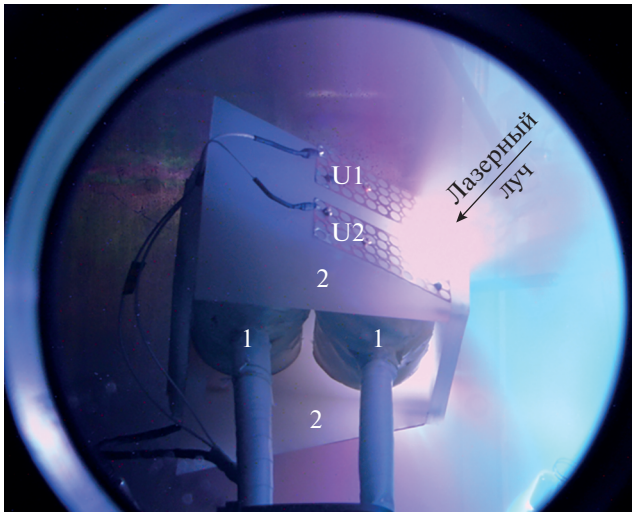

Рис. 1. Фотография системы мишень–диполь во время разлета плазменных потоков: *1* – соленоиды для создания дипольного магнитного поля; *2* – полиэтиленовые мишени; U1 и U2 – медные электроды для измерения электрического потенциала.

получать магнитные поля с большим моментом при меньшем подаваемом напряжении. С двух сторон источника поля (на магнитных полюсах) закреплялись полиэтиленовые (C_2H_4) мишени, которые симметрично и одновременно облучались двумя импульсами CO_2 лазера с энергией $E = 200$ Дж и длительностью $t = 100$ нс, создавая плазменные потоки с концентрацией до $n = 10^{14}$ см$^{-3}$, скоростью $\upsilon = 100$ км · с$^{-1}$ и полной кинетической энергией ≈25 Дж. Поток с корпуса диполя моделировал внутри-магнитосферную плазмы для генерации системы продольных токов Юпитера, подобных ему планет и горячих экзопланет.

Для измерения электрического потенциала и продольных токов использовались плоские медные электроды, закрепленные парами на мишени у каждого полюса диполя (U_1 и U_2 на рис. 1). Одна пара электродов была разомкнута для измерения потенциала относительно общей земли, а вторая закорочена медной шиной, которая помещалась внутрь пояса Роговского для измерения протекающего тока I.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Величина продольных токов, возникающих при разлете плазменных потоков в магнитное поле диполя с моментом $M = 10^6$ Гс · см^3 достигала 1.77 кА (рис. 2*а*). При этом, величина таких токов напрямую зависела от магнитного момента дипольного поля (рис. 3, черная кривая). Характерный трансполярный потенциал достигал величины 275 В. Для сравнения были проведены измерения при $M = 0$. В таком случае между электродами

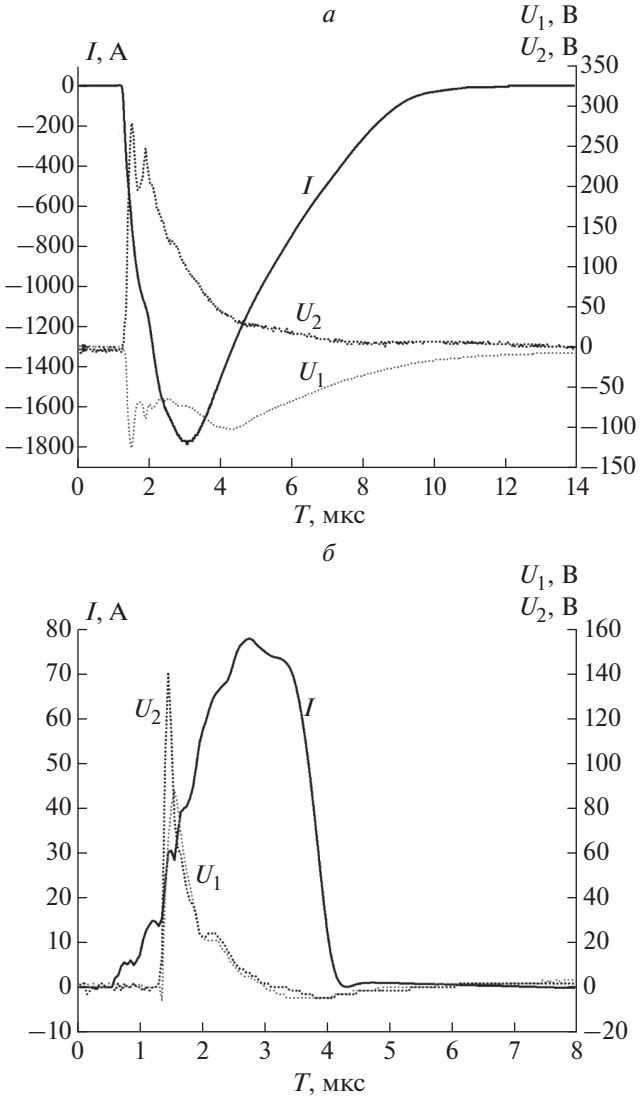

Рис. 2. Величина тока с пояса Роговского (ось слева) и электрического потенциала с двух электродов (ось справа) при разлете плазменных потоков в поле диполя с магнитным моментом $M = 10^6$ Гс · м^3 (*а*) и в вакуум (*б*).

протекал ток относительно небольшой величины $I = 77$ А (рис. 2*б*), вызванный, по-видимому, фототоком при неравномерном облучении медных электродов лазерным излучением.

Также была обнаружена линейная зависимость длительности протекания тока от величины магнитного момента (рис. 3, серая кривая). Например, при магнитном моменте $M = 0.23 \cdot 10^6$ Гс · см^3 длительность протекания тока составила 2.5 мкс, а при $M = 10^6$ Гс · см^3 – 3.9 мкс (длительность протекания тока определялась на полувысоте распределения). Это может быть связано с тем, что магнитное поле с большим моментом задерживает плазменный поток на более дли-

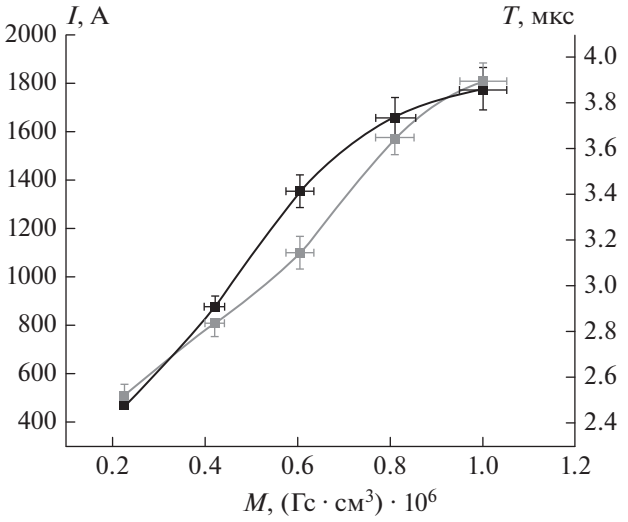

Рис. 3. Величина (ось слева) и длительность протекания (ось справа) продольного тока в зависимости от магнитного момента поля диполя.

тельное время, позволяя ему формировать продольные токи.

Измеренная величина трансполярного потенциала и полного тока позволяет в первом приближении определить полную энергию, переданную в продольные токи, которая составила 1.1 Дж. То есть, эффективность передачи энергии от плазменных потоков в продольные токи составила 4.4%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы активно открываются планеты типа горячих Юпитеров, которые могут обладать собственным магнитным полем и внутримагнитосферными плазменными потоками. На таких планетах можно ожидать разнообразные и новые физические явления, одним из которых являются продольные токи, вызванные движением плазмы вдоль расширяющихся силовых линий магнитного поля. Продольные токи являются важным элементом планетарных магнитосфер, передавая энергию из пограничного слоя и магнитодиска в полярную ионосферу и вызывая такой ключевой эффект, как генерация радиоизлучения.

На данный момент изучение планет типа горячих Юпитеров происходит преимущественно с помощью численного моделирования, входные данные для которого получают с помощью спектрального анализа подобных планет. Для полноценного численного моделирования сложных процессов, происходящих на горячих Юпитерах, данных со спектрального анализа, зачастую, бывает недостаточно. Для предоставления недостающих данных может быть использовано лабораторное моделирование.

В данной работе была впервые продемонстрирована возможность лабораторного моделирования продольных токов, возникающих на планетах типа горячих Юпитеров. Для создания внутримагнитосферных плазменных потоков использовалось облучение полиэтиленовых мишеней мощным лазерным импульсом. При разлете таких потоков в поле диполя с величиной магнитного момента до $M = 10^6$ Гс · см^3 возникали продольные токи, достигающие величины $I = 1.77$ кА. Величина и длительность протекания токов напрямую зависели от магнитного поля. При этом токи не возникали при разлете плазменных потоков в вакуум, что свидетельствует о моделировании процесса возможного лишь в присутствии магнитного поля – продольных токов.

Полученные результаты могут быть использованы для будущих лабораторных экспериментов по данной тематике, которые позволят усовершенствовать модели планет типа горячих Юпитеров.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-12-00080-П), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-2921018), а также в рамках темы государственного задания (№ 0243-2021-0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геворкян Л.Б., Оришич А.М., Пономаренко А.Г. и др.* // Аэрофизические исследования: Сб. науч. тр. № 6: Физ. газодинам. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1976. С. 192.
2. *Захаров Ю.П., Оришич А.М., Пономаренко А.Г.* Лазерная плазма и моделирование нестационарных космических процессов. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1988. 220 с.
3. *Shaikhislamov I.F., Antonov V.M., Zakharov Y.P. et al.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2009. V. 51. No. 10. Art. No. 105005.
4. *Ponomarenko A.G., Zakharov Y.P., Antonov V.M. et al.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2008. V. 50. No. 7. Art. No. 074015.
5. *Антонов В.М., Бояринцев Э.Л., Захаров Ю.П. и др.* // ПМТФ. 2010. Т. 51. № 5. С. 25; *Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Zakharov Y.P. et al.* // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2010. V. 51. No. 5. P. 340.
6. *Шайхисламов И.Ф., Антонов В.М., Бояринцев Э.Л. и др.* // Косм. иссл. 2012. Т. 50. № 6. С. 441; *Shaikhislamov I.F., Antonov V.M., Boyarintsev E.L. et al.* // Cosmic Res. 2012. V. 50. No. 6. P. 410.
7. *Shaikhislamov I.F., Zakharov Y.P., Posukh V.G. et al.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2011. V. 53. No. 3. Art. No. 035017.

Laboratory modeling of a field-aligned currents system generated by a flow of inner magnetospheric laser plasma

A. A. Chibranov[a, *], A. G. Berezutsky[a], M. A. Efimov[a], Y. P. Zakharov[a], I. B. Miroshnichenko[a], V. G. Posukh[a], M. S. Rumenskikh[a], P. A. Trushin[a], I. F. Shaikhislamov[a]

[a] *Institute of Laser Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

**e-mail: chibranov2013@yandex.ru*

For the first time in laboratory conditions, an experiment to simulate a system of field-aligned currents in a dense inner magnetospheric plasma was carried out. The magnitude and time of the flow of field-aligned currents were measured as a function of the magnetic field.