

УДК 533.95

## ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА КРУПНОМАСШТАБНОМ ПЛАЗМЕННОМ СТЕНДЕ «КРОТ»

**А.С. Николенко, М.Е. Гущин, С.В. Коробков, И.Ю. Зудин, А.В. Стриковский**

Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия, nikolenko@ipfran.ru

## LABORATORY MODELING OF ACTIVE IONOSPHERIC EXPERIMENTS ON THE KROT LARGE-SCALE PLASMA DEVICE

**A.S. Nikolenko, M.E. Gushchin, S.V. Korobkov, I.Yu. Zudin, A.V. Strikovskiy**

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia, nikolenko@ipfran.ru

**Аннотация.** Представлены результаты модельных экспериментов по инъекции плотных плазменных облаков, создаваемых малогабаритным коаксиальным генератором, в вакуум и в фоновую плазму большого объема при наличии внешнего магнитного поля. На установке «Крот» реализован режим «безграничной» фоновой среды, позволяющий изучать динамику плазменного облака на масштабе порядка одного метра поперек и вдоль квазиоднородного магнитного поля и приближающий условия к ионосферному активному эксперименту. Изучены динамика диамагнитной каверны, возникающей при вытеснении магнитного поля сгустком плазмы; электромагнитные шумы, возникающие в каверне, а также эволюция структуры плазмы облака во время инъекции и на стадии его распада.

**Ключевые слова:** лабораторное моделирование, активные эксперименты, диамагнитная каверна, неустойчивость.

**Abstract.** The results of model experiments on the injection of dense plasma clouds generated by a small coaxial generator into vacuum and into large-volume background plasma in the presence of an external magnetic field are presented. The Krot plasma device implements the boundary-free regime, which allows us to study dynamics of a plasma cloud on a scale of about one meter across and along a quasi-uniform magnetic field, and brings the conditions closer to an ionospheric active experiment. We have studied the dynamics of the diamagnetic cavity, which appears when a magnetic field is expelled by a plasma cloud, the electromagnetic noise arising in the cavity, as well as the evolution of the cloud plasma structure during injection and at the stage of its decay.

**Keywords:** laboratory modeling, active experiments, diamagnetic cavity, instability.

### ВВЕДЕНИЕ

Задача разлета облаков плотной плазмы в замагниченную ионизированную среду возникает в различных областях геофизики и астрофизики. Искусственные плазменные потоки могут быть созданы при проведении космических активных экспериментов [Haegendel, 2019; Winske et al., 2019]. Такие эксперименты дают бесценный научный материал, однако интерпретация и прогноз их результатов затруднены в силу непредсказуемости природных условий, а также недостаточной изученности физической картины в целом. Кроме того, в натурном эксперименте невозможно обеспечить необходимую повторяемость исследований и отсутствует возможность целенаправленного варьирования параметров эксперимента. По указанным причинам весьма перспективным подходом представляется лабораторное моделирование. Преимуществом лабораторного эксперимента является возможность управления внешними условиями при проведении многократных измерений с накоплением больших объемов данных. При этом может быть использован весь арсенал современных диагностических средств, в том числе дублирующих и дополняющих друг друга.

В ИПФ РАН для моделирования активных ионосферных экспериментов используется крупномасштабная установка — плазменный стенд «Крот», в состав которого входят вакуумная камера объемом  $170 \text{ м}^3$  с источниками фоновой плазмы и магнитного поля. Ниже кратко представлены результаты, полученные в модельных экспериментах по расширению плотных высокоскоростных плазменных облаков в замагниченной фоновой среде.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка «Крот» представляет собой вакуумную камеру, откачиваемую до давления остаточных газов  $10^{-6}$  Торр, внутри нее установлен соленоид, формирующий магнитное поле индукцией до 1000 Гс. В рабочей секции камеры импульсным индукционным высокочастотным разрядом создается цилиндрический столб фоновой плазмы размером  $5 \times 1.5$  м. Максимальная плотность фоновой плазмы в момент пробоя достигает  $n_0 \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , в качестве рабочих газов используется аргон (Ar) и гелий (He).

Для создания облаков плотной плазмы используются коаксиальные пушки на основе отрезков коаксиальных линий с полиэтиленовой изоляцией [Гущин и др., 2018; Коробков и др., 2019; Burdonov et al., 2021]. Длительность инъекции плазменного облака определяется длительностью импульса тока пушки и составляет  $10\div 100$  мкс в зависимости от параметров источника питания. Разброс параметров плазмы от «выстрела» к «выстрелу» пушки — не хуже 10 %, что позволяет накапливать большие массивы экспериментальных данных в сериях последовательных измерений.

Параметры плазмы облака определяются контактно и бесконтактно, в том числе электрическими и магнитными зондами, СВЧ-интерферометром, скоростной ICCD-фотокамерой и средствами пассивной эмиссионной спектроскопии. По этим данным, концентрация плазмы облака в основном объеме составляет  $n_e \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , температура электро-

нов  $T_e \sim 1$  эВ, начальная скорость разлета  $V_0$  лежит в диапазоне 20–40 км/с. По данным спектроскопических измерений, плазма облака в основном представлена ионами углерода невысокой зарядности ( $C^{1+}$ ,  $C^{2+}$ ) и водородом ( $H^+$ ). Начальная энергия облака обычно составляет порядка 0.1 Дж.

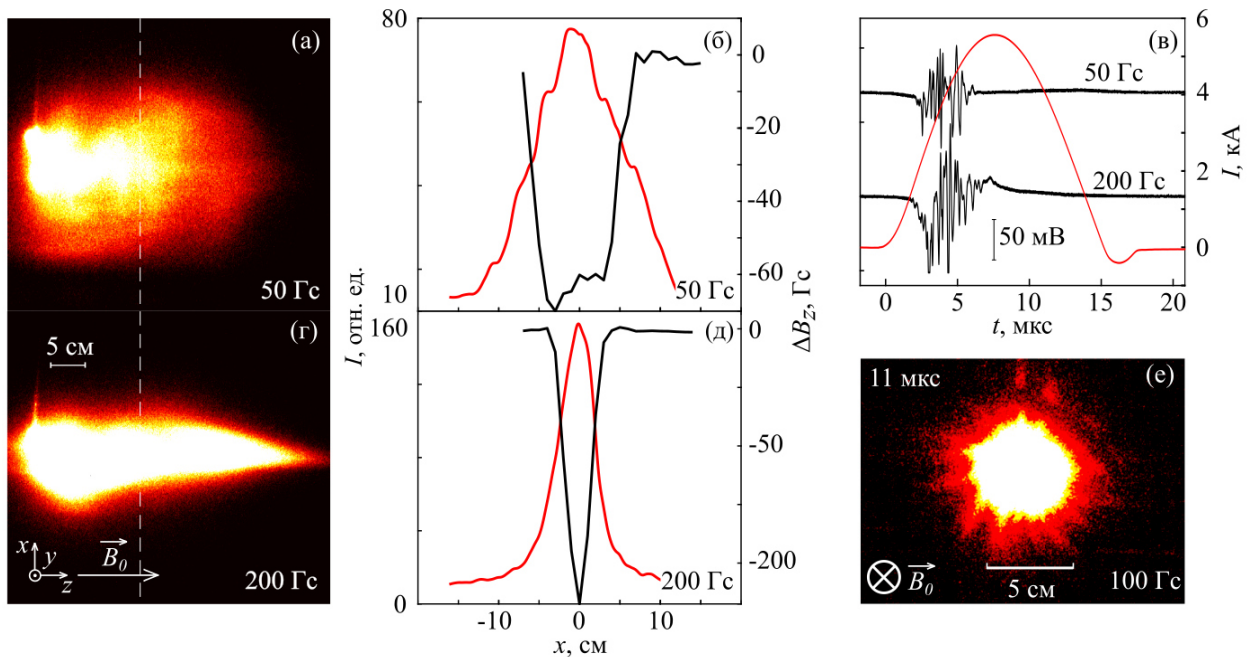
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При инъекции плазменных облаков наблюдается диамагнитный эффект, при котором внешнее магнитное поле в объеме облака ослабляется вплоть до полного вытеснения. Нарис. 1, б, д представлены профили диамагнитных каверн (черные кривые) при инъекции плазмы в поля уровня 50 и 200 Гс, полученные на расстоянии  $z = 10$  см от точки инъекции; в обоих случаях внешнее поле из облака полностью вытеснено. На рис. 1, а, з приведены фотографии облака через 7 мкс после инъекции; полученные из них профили светимости облака (красные кривые) приведены на рис. 1, б, д. Из сопоставления профилей светимости  $I(x)$  и каверны  $\Delta B_z(x)$  видно, что полуширина кривых отличается в 1.5–2 раза. С увеличением индукции  $B_0$  наблюдается уменьшение поперечного размера облака — эффект коллимации плазмы магнитным полем. Сжатие плазменного потока с увеличением магнитного поля сопровождается увеличением яркости свечения облака. При переходе от низких полей (уровня 50 Гс) к умеренным и выше (>200 Гс) наблюдается сужение переднего края облака, сопровождающееся некоторым увеличением его скорости.

Помимо инъекции в вакуум, была проведена серия экспериментов, в которых инъекция плотной плазмы проводилась в присутствии фоновой аргонной и гелиевой плазмы с концентрацией  $n_e \approx 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Динамика расширения плазменного облака в вакуум и фоновую плазму отличается; при наличии фоновой плазмы диамагнитная каверна в целом появляется раньше, чем в вакууме, и ее размер несколько больше. Объяснить это явление можно эффектом «сгребания» более плотным плазменным облаком менее плотной фоновой плазмы.

В экспериментах обнаружена электромагнитная неустойчивость облака, проявляющаяся в виде интенсивных пульсаций магнитного поля в каверне. На рис. 1, в представлены осциллограммы сигналов магнитных зондов при продольной инъекции в поля 50 и 200 Гс без фоновой плазмы; красная кривая представляет импульс тока коаксиальной пушки. Неустойчивость проявляется на стадии расширения облака и прекращается к моменту максимального расширения облака. Амплитуда шумов достигает 20 % от величины диамагнитного сигнала, спектр колебаний простирается до 10 МГц. При типичных условиях эксперимента шумы лежат в нижнегибридном диапазоне.

На стадии торможения облака на его границе развивается неустойчивость желобкового типа. На рис. 1, е приведены фотографии плазменного облака, расширяющегося вдоль магнитного поля около 100 Гс в направлении на наблюдателя. Желобки начинают формироваться на стадии торможения и распада



Результаты исследования явлений, развивающихся при инъекции плазменного облака вдоль  $B_0$ : а, з — фотографии (вид сбоку) плазменного облака при инъекции вдоль полей 50 и 200 Гс; б, д — профили интегральной светимости по сечению, отмеченному штрихами на фотографиях слева (красные кривые), и профили диамагнитной каверны, полученные магнитным зондом в том же сечении (черные кривые); в — осциллограммы, полученные при инъекции в поля уровней 50 и 200 Гс с помощью магнитного зонда, установленного от точки инъекции на расстоянии 10 см (черные кривые), и ток (красная кривая), протекающий через плазменную пушку, в зависимости от времени; е — фотография (вид на наблюдателя) плазменного облака при инъекции вдоль поля уровня 100 Гс, демонстрирующая желобковую неустойчивость границы облака

облака. Отметим, что структурная неустойчивость облака развивается после окончания всплесков электромагнитных шумов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы возмущения фонового магнитного поля при инъекции плазменных облаков вдоль внешнего магнитного поля в вакууме и в присутствии фоновой плазмы. Источник плазмы простой конструкции с относительно низкой (уровня 0.1 Дж) энергией облака позволяет детально исследовать физические эффекты, присущие активным космическим экспериментам с облаками плотной плазмы, включая образование глубоких диамагнитных каверн, коллимацию плазменного потока магнитным полем, возбуждение электромагнитной неустойчивости в каверне, развитие желобковой неустойчивости.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда, проект № 21-12-00385.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гущин М.Е., Коробков С.В., Терехин В.А. и др. Эксперименты по моделированию динамики плотного плазменного облака, расширяющегося в замагниченную фоновую плазму, на крупномасштабном стенде “Крот”. *Письма в ЖЭТФ*. 2018. Т. 108, № 5-6. С. 391–395.

Коробков С.В., Гущин М.Е., Гундорин В.И. и др. Простейшая эрозионная плазменная пушка из коаксиального кабеля с полиэтиленовой изоляцией. *Письма в ЖЭТФ*. 2019. Т. 45, № 5. С. 45–48.

Burdonov K., Bonito R., Giannini T., et al. Inferring possible magnetic field strength of accreting inflows in EXor-type objects from scaled laboratory experiments. *Astron. Astrophys.* 2021. Vol. 648, A81.

Haerendel G. Experiments with plasmas artificially injected into near-Earth space. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2019. Vol. 6, A29.

Winske D., Huba J. D., Niemann C. et al. Recalling and updating research on diamagnetic cavities: Experiments, theory, simulations. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2019. Vol. 5, A51.