

УДК 533.95 + 537.5

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ В АКТИВНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В ИОНОСФЕРЕ И МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2024 г. Б. Г. Гаврилов\*, Ю. И. Зецер

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия*

*\*E-mail: gavrilov@idg.ras.ru*

Одной из фундаментальных проблем астрофизики и геофизики является изучение процессов во внешней и внутренней магнитосфере и ионосфере Земли, связанных с передачей энергии в системе солнечный ветер – магнитосфера и плазмосфера – ионосфера. Важнейшим агентом передачи энергии в этой системе являются плазменные потоки, взаимодействующие с фоновой плазмой и магнитным полем. Их непосредственное исследование с использованием космических аппаратов при сегодняшних технических возможностях космонавтики не представляется возможным. В этих условиях первостепенное значение приобретают активные плазменные эксперименты. Это направление успешно развивается в ИДГ РАН, а фундаментом для постановки экспериментов, разработки исходных данных и необходимых технических и измерительных средств является опыт многолетних исследований в области физики взрыва, проводившихся в Спецсекторе ИХФ РАН, а затем в Спецсекторе ИФЗ РАН и ИДГ РАН под руководством академика М. А. Садовского. Результаты экспериментов, проведённых в сотрудничестве с научными организациями РФ и США, позволили впервые в реальной геофизической среде осуществить комплексные многоточечные измерения параметров плазмы как внутри плазменного потока, так и дистанционно. Анализ результатов экспериментов показал, что их схемы, параметры взрывных генераторов плазмы, диагностическое оборудование позволили исследовать наиболее важные и продолжающие оставаться предметом активного изучения эффекты взаимодействия природных ионосферных плазменных потоков с фоновой средой и геомагнитным полем, их пространственно-временное распределение, основные параметры и результаты воздействия на геофизическую среду.

**Ключевые слова:** ионосфера, магнитосфера, плазменные потоки, геомагнитное поле, продольные токи, активные ракетные геофизические эксперименты.

**Для цитирования:** Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И. Экспериментальное исследование физических эффектов, возникающих при движении плазменных потоков в ионосфере и магнитосфере Земли, в активных геофизических ракетных экспериментах // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 3. С. 146–161. [http://doi.org/10.26006/29490995\\_2024\\_16\\_3\\_146](http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_3_146)

### Введение

Возникновение и эволюция плазменных потоков (ПП) в ионосфере и магнитосфере являются одним из факторов, оказывающих существенное влияние на динамику и состояние геофизической среды, а их изучение является одной из фундаментальных задач астрофизики и геофизики. Само образование магнитосферы есть результат взаимодействия потока солнечной корональной плазмы и геомагнитного поля. Многолетние теоретические и экспериментальные исследования плазменных процессов в верхних геосферах Земли, проводящиеся в Институте динамики геосфер РАН имени академика М. А. Садовского, являются естественным продолжением работ, выполнявшихся в течение почти 80 лет в Спецсекторе Института химической физики, переведенном в 1963 г. в Институт физики Земли, а в 1991 г. преобразованном в ИДГ РАН. Институт носит имя академика М. А. Садовского. Он был среди организаторов и руководителей одного из наиболее масштабных научно-технических проектов в СССР – Атомного проекта. Институт химической физики АН СССР, возглавляемый

академиком Н. Н. Семеновым, играл важную роль в этом проекте, при этом значительная часть задач по исследованию эффектов ядерных взрывов выполнялась Спецсектором ИХФ под руководством М. А. Садовского.

В рамках атомного проекта СССР провел 5 высотных ядерных взрывов [Железняков, Розенблюм, 2002]. Электромагнитные, радиационные, плазменные эффекты активно исследовались с использованием созданной в Спецсекторе научной аппаратуры. Результаты, полученные при проведении высотных ядерных взрывов (ВЯВ), представляют собой уникальную коллекцию данных, востребованных не только в прикладных задачах, но и при проведении фундаментальных исследований. В определенном смысле ВЯВ можно рассматривать как активные геофизические эксперименты, в ходе которых осуществлялось воздействие на геофизическую среду источниками, параметры которых достаточно хорошо известны [Зецер, 2023]. Разработанные под руководством академика М. А. Садовского методы геофизических наблюдений и полученные уникальные научные материалы не теряют своего значения до сегодняшнего дня.

В начале 80-х годов, когда эта тематика стала менее актуальна, Институт сосредоточился на выполнении геофизических исследований в области сейсмических, аэродинамических, плазменных и ионосферных эффектов, вызванных природными и антропогенными воздействиями. Эта смена тематики института и переход к фундаментальным геофизическим исследованиям были обоснованными и естественными, так как опирались на опыт проведения исследований действия взрывов и их взаимодействие с окружающей средой, которые управляются теми же физическими механизмами, что естественные и геофизические процессы [Садовский, 2004].

При обтекании магнитосферы солнечным ветром происходит диффузия плазмы в магнитное поле и образуется пограничный слой, где осуществляется вязкое взаимодействие с передачей импульса от солнечного ветра к магнитосфере. Эффекты плазменных потоков (ПП) природного и антропогенного происхождения исследованы и описаны в многочисленных работах [Данжи, 1961; Зецер и др., 2004; Baumjohann et al., 1990; Shiokawa et al., 1997]. В пограничном слое поток плазмы, направленной поперек магнитного поля, индуцирует поле  $-\mathbf{V} \cdot \mathbf{B}/c$ , что приводит к генерации пар продольных токов на утренней и вечерней сторонах магнитосферы [Iijima, Potemra, 1976], способных оказывать воздействие на параметры ионосферы [Petrukovich et al., 2001] и влияние на динамику самих ПП [Gavrilov, 2021].

Изучение плазменных и магнитогидродинамических эффектов, возникающих при движении плазменных струй в космическом пространстве, затрудняется масштабом явления и сложным характером фоновой среды, представляющей собой сложную нестационарную систему взаимодействующих плотной и разреженной плазмы, электрических и магнитных полей, токов и заряженных частиц. К настоящему времени разработаны многочисленные теоретические модели этих процессов, описывающие их основные черты и закономерности и позволяющие в определенной степени прогнозировать воздействие ПП различного масштаба и происхождения на геофизическую среду и среду обитания человека. Однако значительное разнообразие их параметров, пространственно-временных характеристик и часто гигантский масштаб струйных плазменных течений в ионосфере и магнитосфере не позволяют достаточно корректно описывать эти быстро эволюционирующие явления. Трудно обеспечить одновременное расположение большого количества космических аппаратов в критически важных точках распространяющихся и эволюционирующих ПП, позволяющих исследовать изменение плазменных параметров, магнитных и электрических полей, генерацию токовых систем и других процессов взаимодействия ПП со средой, оказывающих влияние не только на параметры окружающей среды, но и на поведение самих ПП.

Проведение модельных лабораторных экспериментов [Гаврилов и др., 1996] позволяет с определенными ограничениями исследовать основные фундаментальные закономерности взаимодействия плазменных потоков с магнитным полем и окружающей средой. Однако реальные данные могут быть получены только в условиях контролируемых активных плазменных экспериментов (АПЭ) в космосе.

За последние десятилетия проведено множество космических АПЭ с инъекцией нейтрального газа, потоков плазмы или пучков заряженных частиц [Valenzuela et al., 1986; Bernhardt et al., 1992; Swenson et al., 1992; Fuselier et al., 1994; Delamere et al., 2004]. Они позволили исследовать процессы магнитогидродинамического взаимодействия скоростной плазмы и геомагнитного поля, генерацию электромагнитных и МГД волн, оптического излучения в видимом УФ и ИК диапазонах, ионизацию фонового газа, возникновение сложных систем электрических полей и токов, ускорение заряженных частиц и другие явления. Недавний обзор [Haerendel, 2019] содержит весьма полный анализ задач, методов и результатов проведения космических плазменных экспериментов. Возможности большинства из них были в существенной степени ограничены тем, что измерения проводились в одной или двух точках в окрестности плазменного образования, что не давало возможности получения сколько-нибудь полной информации о динамике ПП и процессах в окружающей среде. Разработанные в ИДГ РАН сценарии и технические средства позволили провести ряд экспериментов, лишенных этих недостатков [Адушкин и др., 1993; Зецер и др., 2002; Erlandson et al., 2002; Gavrilov et al., 2004]. В 1999 г. были проведены два российско-американских активных ракетных геофизических эксперимента «North Star» [Гаврилов и др., 2003; Erlandson et al., 2002; Gavrilov et al., 2004; Delamere et al., 2004; Pfaff et al., 2004; Zetzer et al., 2000], сценарии и измерительные возможности которых были специально разработаны для исследования различных стадий взаимодействия плазменных потоков различной плотности в ионосфере.

В статье обсуждаются современные физические представления, полученные в результате анализа экспериментальных данных, а также задачи и возможности проведения новых активных экспериментов.

### Эволюция ПП в магнитном поле и фоновой плазме

Рассмотрим кратко основные процессы взаимодействия ПП с магнитным полем и фоновой средой для нескольких типичных ситуаций. Одним из основных параметров, определяющих взаимодействие движущейся плазмы с магнитным полем, является отношение кинетической энергии ПП к плотности энергии магнитного поля

$$\beta = n_i m_i \mathbf{V}^2 / \frac{\mathbf{B}^2}{8\pi}, \quad (1)$$

где  $n_i$ ,  $m_i$  и  $\mathbf{V}$  – концентрация, масса и скорость ионов струи и  $\mathbf{B}$  – индукция магнитного поля. В зависимости от соотношения плотности ПП, окружающего газа и величины параметра  $\beta$  могут быть рассмотрены несколько сценариев взаимодействия [Gavrilov et al., 1998].

Если плотность энергии плазменной струи превышает плотность энергии магнитного поля ( $\beta > 1$ ), плазма вытесняет магнитное поле, образуя диамагнитную полость. На боковых сторонах струи образуются слои пространственного заряда и возникает электрическое поле  $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$ , препятствующее дальнейшему отклонению частиц. При этом струя продолжает двигаться поперек магнитного поля по прямолинейной траектории. Присутствие фоновой плазмы приводит к генерации альфвеновских волн, распространяющихся вдоль магнитного поля. Альфвеновская волна переносит ток  $i = (c^2/4\pi V_A) \mathbf{E}$ , где  $V_A$  – альфвеновская скорость. В пространстве между парой листов противоположно направленных продольных токов электрическое поле вовлекает в движение фоновую плазму [Sobyanin et al., 2002].

Этот процесс приводит к торможению и отклонению ПП, диффузии магнитного поля в плазму, ее эрозии. В случае малой плотности плазмы и сильного магнитного поля, струйное течение плазмы вырождается в ларморовское вращение заряженных частиц, уходящих вдоль магнитного поля [Gavrilov et al., 1994; Gavrilov et al., 1998]. Такие сценарии поведения ПП, имеющих соответствующие параметры, могут наблюдаться достаточно продолжительное время, или, как это происходило в большинстве космических плазменных экспериментов, реализовываться как последовательные стадии эволюции плазменной струи.

## Эксперимент «North Star»

Уникальная схема эксперимента «North Star» (NS) впервые позволила осуществить комплексные измерения параметров плазменной струи в трех точках траектории движения в ионосфере и провести достаточно полную плазменную диагностику поведения плотных доальфеновских плазменных струй с  $\beta > 1$  и  $\beta < 1$ , инжектированных в ионосферу Земли перпендикулярно силовым линиям геомагнитного поля.

Было осуществлено две инъекции на высотах 360 и 280 км. В эксперименте удалось получить данные по динамике и эволюции плазменного потока, структуре фронта диамагнитной каверны, магнитогидродинамическим возмущениям в фоновой плазме и поляризационным электрическим полям в плазменной струе, генерирующей продольные токи, составу и энергии заряженных частиц, изменению магнитных и электрических полей в струе и ее окрестностях по данным измерений на четырех модулях на расстояниях от 170 до 1500 м от источника плазмы (рис. 1). Ракета Black Brant XII с плазменными генераторами и научной диагностической аппаратурой была запущена 22 января 1999 г. на полигоне Poker Flat на Аляске. Схема эксперимента обеспечила инъекцию струй ионизированного алюминия перпендикулярно геомагнитному полю. В процессе обеих инъекций проводились оптические измерения с американского спутника MSX и с поверхности Земли.

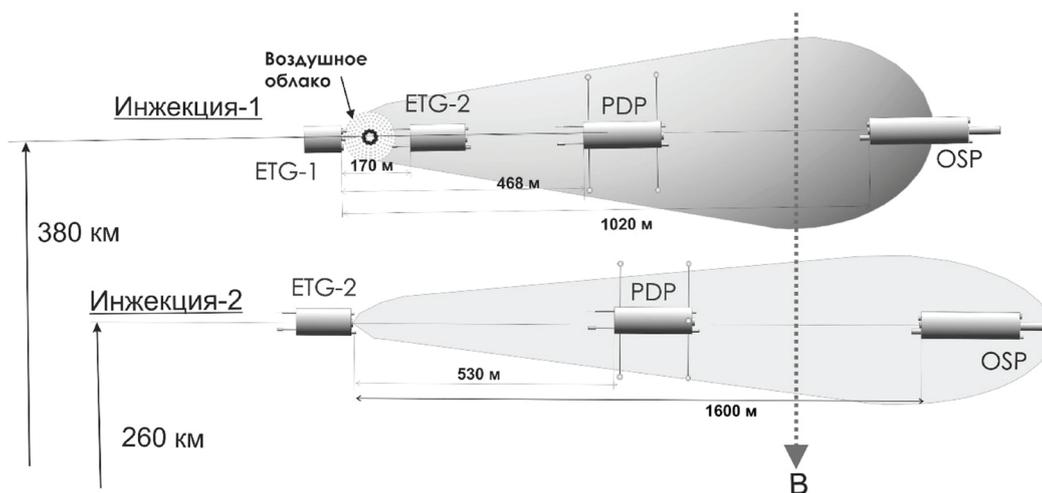


Рис. 1. Схема проведения эксперимента NS

В качестве источников плазменной струи использовались, разработанные в ИДГ РАН, взрывные генераторы плазменной струи [Адушкин, 1994], установленные на модулях ETG-1 и ETG-2. В генераторах используется принцип испарения твердого вещества (пористый алюминий) и ускорения паров сходящейся к оси ударной волной, возбуждаемой взрывом заряда мощного взрывчатого вещества. Наземные испытания плазменных генераторов показали, что масса струи не превышает 30 г, а максимальная скорость разлета составляет 42 км/с. Энергия плазменной струи равна 5 МДж. Практически вся энергия и масса струи сосредоточены в угле раствора  $30^\circ$  [Erlandson, 2002].

При первой инъекции (далее И-1) за 200 мс до выхода плазменной струи был произведен выпуск 11.5 г сжатого воздуха, создавший на пути струи облако нейтрального газа [Erlandson, 2002]. Цель создания облака заключалась в увеличении ионизации плазмы за счет взаимодействия струи с нейтральными молекулами воздуха. Измерения показали, что при выпуске плазмы в воздушное облако наблюдался значительный рост концентрации плазмы. Вторая инъекция плазмы (И-2) была произведена на высоте 280 км. В отличие от первого эксперимента И-2 проводилась в естественной атмосфере.

## Регистрация электродинамических и магнитогидродинамических процессов

Результаты измерения концентрации плазмы и вариаций магнитного поля в струе в эксперименте И-1 на расстояниях 170, 468 и 1020 м от плазменного генератора представлены на рис. 2. Плотность фоновой плазмы до инъекции составила  $\sim 7 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Значительный рост концентрации плазмы на расстоянии 170 м от источника струи был зарегистрирован через 4 мс после детонации взрывного генератора, что соответствует скорости прихода плазмы  $\sim 42 \text{ км/с}$ . Максимум плотности плазмы  $\sim 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$  достигается на 7 мс. Далее  $n_i$  постепенно снижается.

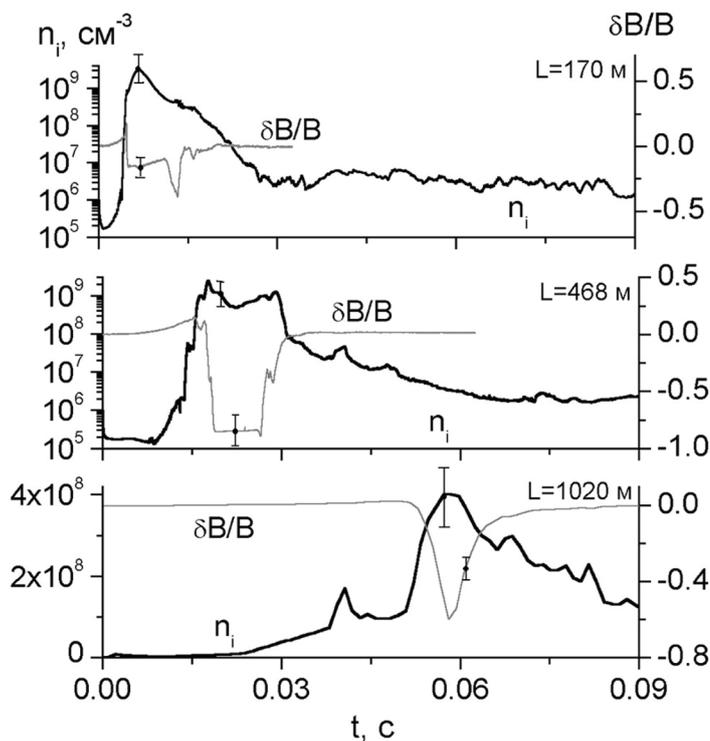
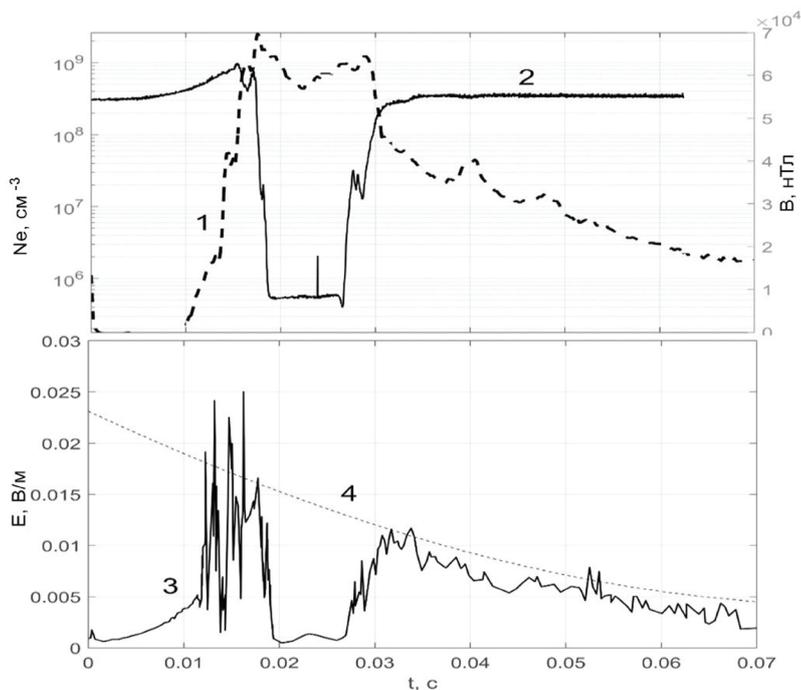


Рис. 2. Эксперимент NS И-1. Концентрация плазмы (толстая кривая) и изменение магнитного поля (тонкая кривая) на расстоянии 170 м (верхняя панель), 468 м (средняя панель) и 1020 м (нижняя панель) от плазменного генератора

Резкое увеличение концентрации плазмы на расстоянии 468 м от плазменного генератора зарегистрировано на 13.7 мс, что соответствует средней скорости 34 км/с. На фронте наблюдаются высокочастотные колебания зондового тока. Максимум плотности зарегистрирован на 17.7 мс. Далее плотность плазмы слегка уменьшается, и на 29 мс регистрируется второй пик  $n_i = 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Далее концентрация ионов постепенно уменьшается. На расстоянии 468 м от взрывного генератора вытеснение магнитного поля наблюдалось по всем трем компонентам. Максимальное поджатие магнитного поля ( $\sim 15\%$ ) зарегистрировано на переднем фронте диамагнитной полости к моменту времени 15.4 мс. Далее начинается резкое уменьшение магнитного поля.

Фронт плазменного сгустка на расстоянии 1020 м от плазменного генератора регистрируется на 50.9 мс, что соответствует средней скорости 20 км/с. Максимум плотности  $n_i = 4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$  достигается на 57.3 мс. Плотная плазма с концентрацией  $n_i > 10^6 \text{ см}^{-3}$  наблюдается в течение 400 мс. Перед фронтом струи наблюдается небольшое усиление магнитного поля, обусловленное распространением магнитозвукового возмущения в ионосферной плазме. Максимальное поджатие магнитного поля достигается на 50.4 мс. Далее магнитное поле начинает уменьшаться вплоть до величины 0.2 Гс на 58 мс. Длительность диамагнитного сигнала совпадает с областью максимальной концентрации плазмы. Степень вытеснения магнитного поля не превышает 60%.

На рис. 3 изменение концентрации плазмы и магнитного поля в струе показаны вместе с измеренным поперечным электрическим полем в плазменной струе. На расстоянии 468 м от взрывного генератора наблюдалось практически полное вытеснение магнитного поля плазменной струей, при этом в области диамагнитной каверны профиль плотности плазмы имеет характерную двухпиковую структуру, что



**Рис. 3.** Результаты измерений плотности плазмы (1), вариаций магнитного поля (2), электрического поля в струе (3) и расчётное значение электрического поля (4) на расстоянии 468 м от генератора плазмы в эксперименте NS И-1

может быть связано с формированием оболочечной структуры плазменного сгустка. Формирование плазменной оболочки в движущейся плазме с  $\beta > 1$  наблюдалось в космическом эксперименте AMPTE [Bernhardt, 1992] и при численном моделировании [Papadopoulos et al., 1991].

Райзером (1963 г.) была рассмотрена задача о расширении сверхпроводящего шара в вакуум в присутствии магнитного поля. Было показано, что перед фронтом плазмы должно наблюдаться поджатие магнитного поля  $\delta B/B_0 \approx 50\%$ . В нашем случае степень поджатия магнитного поля на фронте диамагнитной каверны не превышает 15%. Слабое поджатие магнитного поля вероятно связано с тем, что тормозящийся плазменный поток движется с доальфвеновской скоростью. В этом случае магнитогидродинамические волны переносят энергию возмущения магнитного поля с альфвеновской скоростью в фоновой плазме на большие расстояния от струи, снижая эффект поджатия непосредственно перед фронтом струи.

Уравнение баланса давлений на границе диамагнитной каверны может быть записано в виде:

$$n_i m_i V^2 + \frac{B_i^2}{8\pi} = \frac{B_0^2}{8\pi} \quad (2)$$

где  $n_i$ ,  $m_i$  и  $V$  – концентрация, масса и скорость ионов,  $B_0$  – невозмущенное магнитное поле,  $B_i$  – магнитное поле в струе. При скорости струи порядка 40 км/с для вытеснения магнитного поля концентрация ионов должна составлять  $2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , что хорошо согласуется с данными зондовых измерений. Границы каверны совпадают с областью концентрации ионов  $n_i = 5 \cdot 10^8 \div 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ .

Результаты измерения электрического поля в плазменном потоке согласуются с данными регистрации магнитного поля [Pfaff et al., 2004]. Компонента электрического поля  $E_y$ , перпендикулярная вектору скорости струи и направлению магнитного поля, измеренная на расстоянии 468 м от плазменного генератора, показана на нижней панели рис. 3. Электрическое поле генерируется как перед диамагнитной полостью, так и сразу за ней. С момента времени  $\sim 17$  мс  $E_y$  быстро уменьшается до нуля (внутри диамагнитной полости) и остается таким до  $t \sim 33$  мс. Далее магнитное поле проникает в плазменный поток, и в этой области снова возникает электрическое поле  $E_y$ . Наблюдается плавное уменьшение  $E_y$ , связанное с уменьшением скорости плазменной струи. Из графика видно, что в И-1 экспериментальные значения поперечного электрического поля практически совпадают с данными расчета по формуле:  $E = -V \cdot B/c$ , где  $V$  – времяпролетная скорость.

На рис. 4 показано изменение плотности плазменной струи в И-1 при ее распространении на расстоянии от 170, 468 и 1200 м от источника плазмы. Оценки показывают, что падение плотности струи соответствует увеличению объема плазменного образования. Оценка времяпролетной скорости струи на уровне концентрации ионов  $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$  показывает, что скорость переднего фронта падает на расстоянии порядка 1 км примерно в два раза, в то время как скорость заднего фронта струи остаётся практически постоянной с тенденцией к росту. Если это не результат погрешности измерений, ускорение заднего фронта может быть связано с действием захваченных электронов фонового газа.

Движение однородной струи описывается уравнениями двухжидкостной МГД:

$$m_i d\mathbf{V}_i/dt = e\mathbf{E} + e(\mathbf{V}_i \times \mathbf{B})/c + (\mathbf{V}_e - \mathbf{V}_i)m_e/\tau; \quad (3)$$

$$m_e d\mathbf{V}_e/dt = -e\mathbf{E} - e(\mathbf{V}_e \times \mathbf{B})/c - (\mathbf{V}_e - \mathbf{V}_i)m_e/\tau. \quad (4)$$

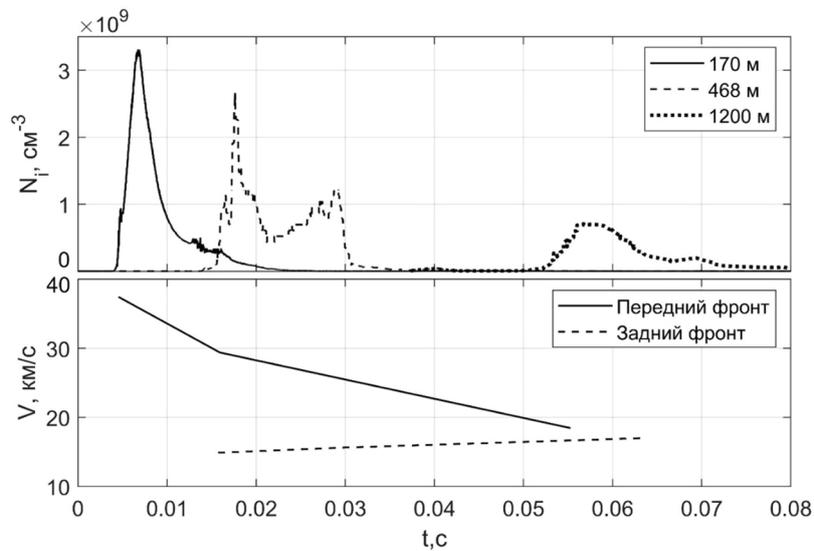


Рис. 4. Результаты измерений плотности плазмы в эксперименте И-1 на разных расстояниях от инжектора (верхняя панель) и скорости переднего и заднего фронтов плазменного сгустка на уровне концентрации  $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$  (нижняя панель)

Рассмотрим возможные факторы, которые могут привести к торможению плазменной струи.

Влияние фоновой плазмы на динамику плазменной струи с  $\beta > 1$  может не учитываться, так как газокINETическое давление фоновой плазмы существенно ниже давления магнитного поля. В этом случае потери кинетической энергии плазменного сгустка, распространяющегося в промагнитченной фоновой плазме, будут практически такими же, как и в отсутствие фоновой среды.

Известно, что одним из наиболее эффективных факторов торможения плазменного потока в магнитном поле являются продольные токи [Gavrilov, 2021]. Если плотность энергии плазменной струи превышает плотность энергии магнитного поля ( $\beta > 1$ ), плазма вытесняет магнитное поле, образуя диамагнитную полость. Возникает электрическое поле  $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$ , препятствующее дальнейшему отклонению частиц. При этом плазменный поток движется поперек магнитного поля по прямолинейной траектории практически без торможения. Если этот процесс происходит в фоновой плазме, электрическое поле  $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$  приводит к генерации альфвеновских волн, распространяющихся вдоль магнитного поля. Электрическое поле вовлекает в движение фоновую плазму, что снижает скорость плазменного потока. Однако в момент времени 0.025–0.027 с магнитное поле из струи вытеснено, что приводит к отсутствию в струе поляризованного электрического поля и, следовательно, продольных токов, которые могли бы привести к эффективному торможению плазменного потока. Тем не менее наблюдается заметное торможение плазмы. Это означает, что в это время действует какой-то другой механизм торможения.

Таким механизмом может являться воздействие на динамику плазменного потока частиц, отражённых от переднего фронта струи. В работе [Райзер, 1963] показано, что при отражении от движущейся границы диамагнитной каверны заряженные частицы теряют кинетическую энергию. В эксперименте NS И-1 было получено экспериментальное подтверждение возможности реализации этого эффекта. Плазменные измерения на борту модуля PDP, находящегося на расстоянии 468 м от источника плазмы, проводились зондами Ленгмюра и электростатическим электронным (MESA и SESA) и ионным анализатором (IESA) [Lynch et al., 2004]. Ионы, двигавшиеся навстречу плазменному потоку, были реально обнаружены в эксперименте, т.е. возможность потери кинетической энергии потока в результате воздействия отражения от движущегося фронта диамагнитной каверны заряженных частиц может рассматриваться как реальный механизм торможения плазмы.

Другая динамика плазменной струи наблюдалась в эксперименте И-2 (рис. 5). Отметим, что скорости плазменного потока в И-1 и И-2 на дистанции  $\sim 500$  м оказались практически равны, несмотря на то, что концентрация плазмы в И-2 оказалась на два порядка ниже, чем в И-1. Уменьшение концентрации плазмы во втором эксперименте связано с тем, что Инжекция-2 проводилась в фоновой ионосфере и дополнительная ионизация, связанная с инъекцией струи в плотное воздушное облако, как это происходило в И-1, отсутствовало. На пути в 1 км концентрация плазмы падает примерно на порядок.

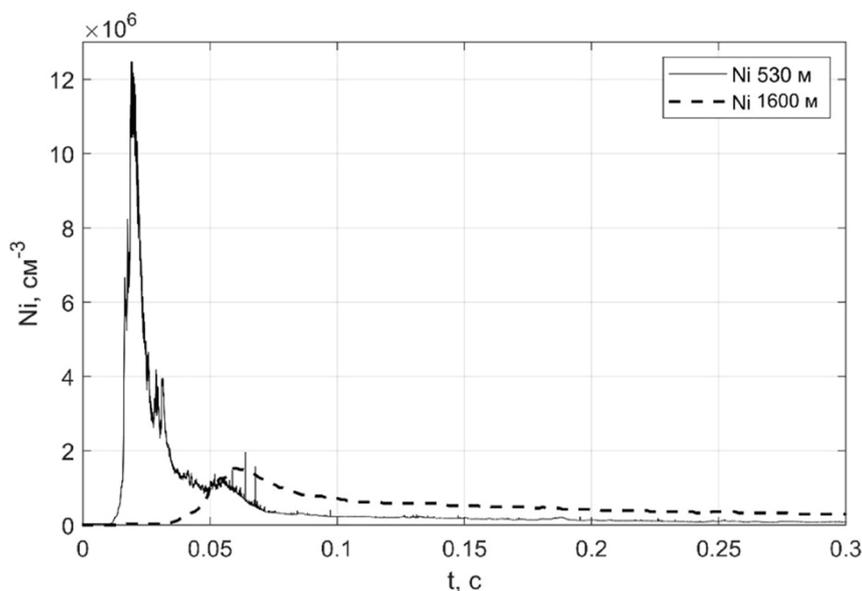
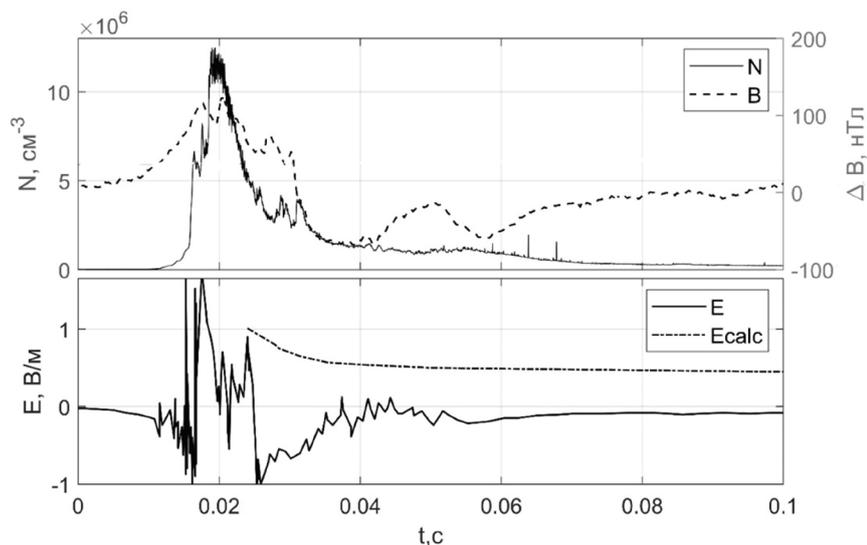


Рис. 5. Результаты измерений плотности плазмы в эксперименте И-2 на расстоянии 530 и 1600 м от инжектора

Данные измерений концентрации ионов зондами Ленгмюра и магнитного поля в струе показывают (рис. 6), что на расстоянии 537 м плазменная струя практически полностью промагничена. Степень вытеснения магнитного поля в струе определяется концентрацией ионов и температурой плазмы. В И-2 максимальная плотность плазмы равна  $n_i = 4 \cdot 10^7 cm^{-3}$ . Из условия (1) баланса давления следует, что плазма с такой концентрацией могла ослабить поле лишь на несколько процентов, что и наблюдается в эксперименте.

Сразу после начала инъекции регистрируется плавный рост магнитного поля, связанный с распространением с альфвеновской скоростью магнитозвукового возмущения в фоновой плазме. Максимальное поджатие магнитного поля достигает  $\sim 0.5\%$ . За поджатием на фронте следует небольшое ослабление магнитного поля в струе (слабый диамагнитный эффект).

На нижней панели рис. 6 показаны результаты измерений квазипостоянного электрического поля вдоль оси  $Y$ , перпендикулярной вектору скорости струи и направлению магнитного поля. Здесь же показан результат расчета значения электрического поля по формуле:  $E = -V \cdot B/c$ , где  $V = L/t$  – времяпролетная скорость,  $L = 537$  м – расстояние до плазменного генератора. С 26 мс регистрируется поле  $E_y$  положительной полярности, связанное с движением плазменной струи с  $\beta < 1$



**Рис. 6.** Результаты измерений плотности плазмы  $N$ , вариаций магнитного поля в струе  $B$ , электрического поля в струе  $E$  и расчётного значения электрического поля  $E_{calc}$  на расстоянии 530 м от генератора плазмы в эксперименте NS И-2

поперек магнитного поля. Экспериментальное и расчётное значение поля в этот момент времени практически совпадают. Далее поперечное электрическое поле в струе оказывается меньше значения  $V \cdot B/c$ . Наблюдается деполяризация плазмы. В этом случае следует ожидать, что движение плазменной струи будет сопровождаться возбуждением в ионосферной плазме альфвеновских волн, переносящих продольные токи вдоль магнитных силовых линий. В слоях продольных токов фоновая плазма увлекается в движение в направлении движения плазменного потока. Таким образом, кинетическая энергия потока передается в фоновую плазму, и плазменная струя тормозится.

В общем случае продольные токи могут замыкаться токами проводимости в столкновительной фоновой плазме или поляризационными токами на фронте альфвеновской волны. На высоте 280 км ионы и электроны фоновой плазмы замагничены и замыкание продольных токов токами проводимости в окружающей фоновой плазме не происходит. В этом случае замыкание ПТ может происходить в нижних слоях ионосферы, где проводимости вдоль и поперек магнитного поля сравниваются на высоте  $\sim 100$  км. Тогда характерное время распространения альфвеновской волны равно  $t_A = 180/V_A = 180$  мс, где  $V_A \sim 1000$  км/с – альфвеновская скорость. Значение  $t_A$  существенно превышает время наблюдения струи на измерительных модулях в эксперименте. В этом случае замыкание продольных токов могло осуществляться только на фронте альфвеновской волны. Однако оценка показывает, что в эксперименте наблюдалось слабое торможение струи. Струя проходит значительное расстояние.

Слабая эффективность торможения в Инжекции-2 может быть также обусловлена присутствием в плазменном потоке большого количества нейтралов, которые в процессе резонансной перезарядки передают кинетическую энергию ионизованной части струи, тормозящейся в магнитном поле силой Ампера. Аналогичная ситуация имеет место в МГД генераторах, где электрическая энергия черпается из потока нейтрального газа, а небольшая примесь заряженных частиц является только промежуточным элементом, обуславливающим взаимодействие струи нейтрального газа с магнитным полем.

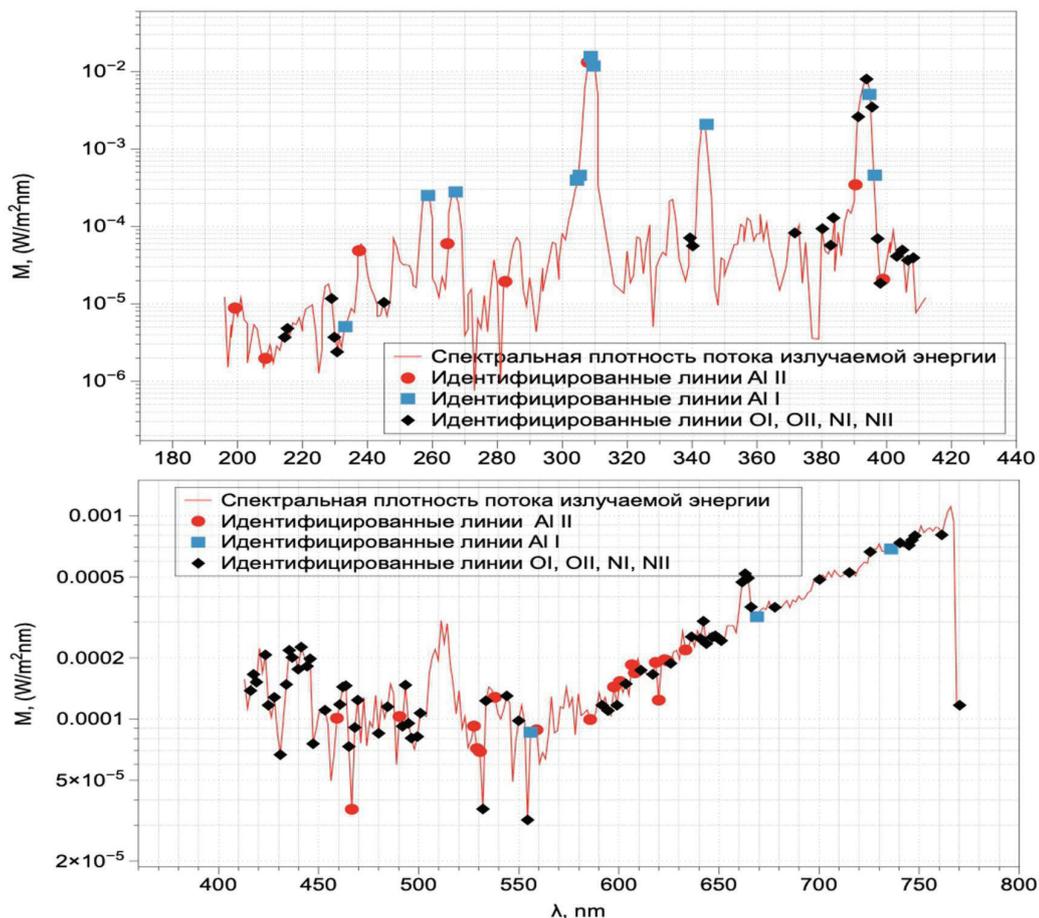
Щелевыми спектрографами SPIM, установленными на спутнике MSX [Mill et al., 1994], с которого велось наблюдение эксперимента с расстояния 2500–3000 км, было обнаружено увеличение интенсивности свечения за пределами зоны инжекции. Наиболее интенсивное свечение наблюдалось на длинах волн 628.7 и 634.5 нм, близких к линии атомарного кислорода. Свечение могло быть вызвано ионизацией фонового газа потоком высыпавшихся электронов [Poklad et al., 2018].

### Оптическая регистрация

При оптической регистрации плазменных потоков и их взаимодействия с окружающей средой использовалась уникальная оптическая аппаратура на измерительных модулях, расположенных по ходу распространения плазменной струи (рис. 1) на поверхности Земли и на спутнике MSX.

Спектральный диапазон этой аппаратуры составлял от 0.1 до 24 мкм, временное разрешение от мс до десятков с. Использование таких спектральных и временных масштабов позволило исследовать различные стадии развития процессов, происходящих при инжекции.

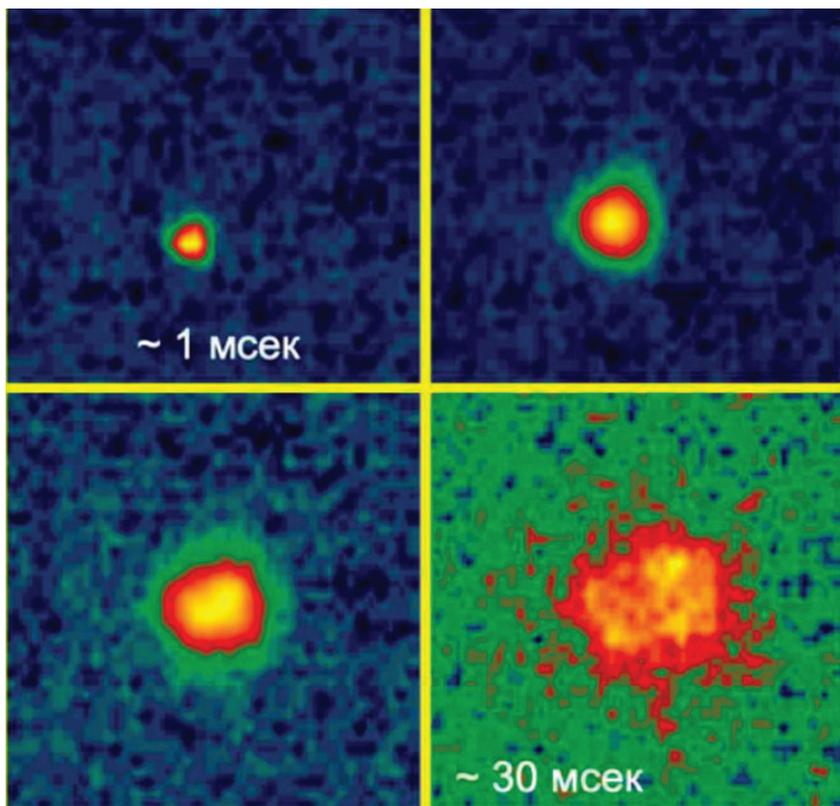
На рис. 7 показаны графики спектральной плотности потока энергии, излучаемой плазменной струей, через ~ 5 мс после инжекции вместе с идентифицированными спектральными линиями алюминия, кислорода и азота в диапазоне 180–440 нм (верхняя панель) и 400–800 нм (нижняя панель). Можно видеть, что на начальных временах наиболее интенсивными являются линии алюминия (собственно инжектируемая плазма), яркость которых более, чем на порядок превышает интенсивность линий кислорода и азота (окружающая ионосфера).



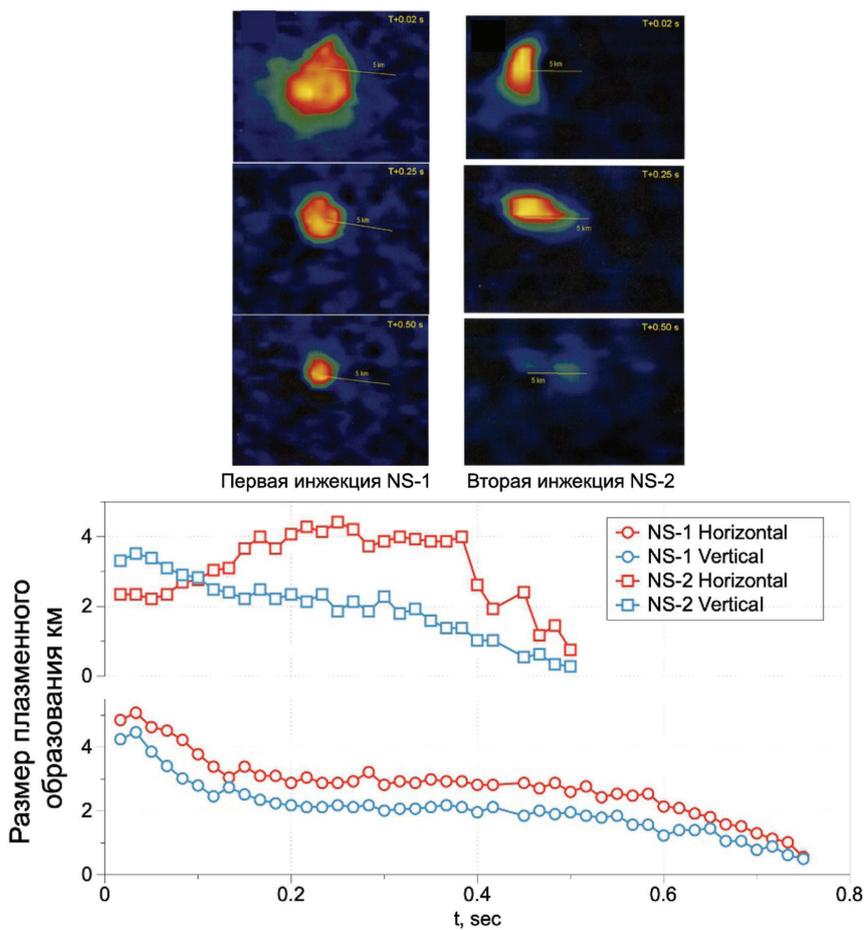
**Рис. 7.** Спектральная плотность потока энергии, излучаемой инжектируемой плазменной струей при первой инжекции в момент времени ~ 5 мс в диапазонах длин волн 180–440 нм (верхняя панель) и 400–800 нм (нижняя панель). Значками показаны идентифицированные спектральными линиями алюминия, кислорода и азота

На рис. 8 приведены изображения области взаимодействия плазменной струи с окружающей ионосферой при первой инжекции в различные моменты времени. Четко видны стратификация плазменного образования, а также неоднородное свечение внутри плазменного образования.

На рис. 9 приведены изображения плазменной струи, полученные из наземного пункта Poker Flat с помощью ТВ камеры с узким полем зрения (SIT), а также горизонтальный и вертикальный размеры этих изображений. Линия показывает направление инжекции, магнитное поле – перпендикулярно этому направлению. Можно видеть, что при второй инжекции в начальные моменты времени изображение вытягивается вдоль магнитного поля, а распределение яркости внутри изображений существенно неоднородно.



**Рис. 8.** Изображения области взаимодействия плазменной струи при первой инъекции с окружающей ионосферой в различные моменты времени



**Рис. 9.** Изображения плазменной струи, полученные из Poker Flat с помощью ТВ камеры с узким полем зрения (SIT), и горизонтальный и вертикальный размеры этих изображений

Обнаруженные в эксперименте особенности эволюции плазменной струи (в том числе отмеченная ранее стратификация и целый ряд других эффектов взаимодействия ПП с фоновым газом и магнитным полем) еще ждут более детального рассмотрения и разработки новых физических и прогностических моделей, учитывающих эти явления (см., например, [Ковалева и др., 2020; Лосева и др., 2021; Урвачев и др., 2023; Kovaleva et al., 2021]).

### **Обсуждение и выводы**

Исследование возникновения и эволюции в магнитосфере и ионосфере плазменных потоков различного происхождения и масштаба – одна из фундаментальных задач геофизики, изучение которой в реальных природных условиях представляет значительные трудности. Определенные успехи достигнуты при изучении электродинамических и плазменных эффектов, сопровождающих эволюцию ПП в магнитном поле в лабораторных условиях. В тоже время естественные ограничения адекватного масштабирования сложной системы распространения плазмы в атмосферно-ионосферно-магнитосферной системе и магнитном поле являются препятствием для полноценного лабораторного моделирования.

Именно активные эксперименты в ионосфере и магнитосфере предоставили большое количество важной информации о механизмах взаимодействия плазмы и замагниченного фона. Образование и аннигиляция диамагнитной полости, генерация электромагнитных и плазменных волн, генерация электрических полей и токов были успешно воспроизведены и изучены в космических экспериментах [Haerendel, 2019].

Оригинальная схема осуществления эксперимента «North Star» впервые позволила провести комплексные многоточечные измерения параметров плазмы как внутри плазменного потока, так и дистанционно с поверхности Земли и аппаратурой спутника MSX, находившегося на расстоянии порядка 3000 км от точки инжекции. Полученный в эксперименте NS и проведенном ранее эксперименте Fluxus значительный объем данных по свечению струи, возбуждению и ионизации, аномально длительному свечению окружающего газа, изменению размера светящейся области, значительно превосходящей расчетные величины, подробно обсуждаются в ряде работ [Erlandson et al., 1999; Erlandson et al., 2002].

Анализ результатов эксперимента показал, что его схема, параметры взрывных генераторов плазмы, диагностическое оборудование позволили воспроизвести в реальной геофизической среде наиболее важные и продолжающие оставаться предметом активного изучения эффекты взаимодействия природных ионосферных плазменных потоков с фоновой средой и геомагнитным полем.

Среди актуальных, но не реализованных в эксперименте задач, можно отметить отсутствие или недостаток прямых измерений распространяющихся от плазменной струи МГД волн и продольных токов, высыпания частиц, эффектов в окружающей плазменную струю среде. Измерения электрических полей в плазме показывают, что с высокой вероятностью должны генерироваться возмущения вдоль магнитного поля в виде альфвеновской волны, вызывающей соответствующие эффекты в окружающем газе в виде увлечения его в движение, нагрева, дополнительной ионизации и возможно ускорения заряженных частиц в случае возникновения продольных электрических полей при нарушении эквипотенциальности магнитных силовых линий, появления двойных слоев или областей аномального сопротивления в результате развития гидродинамических или плазменных неустойчивостей.

То же можно сказать о связи обнаруженного послесвечения в линиях атомарного кислорода с зарегистрированными в эксперименте потоками электронов вдоль магнитного поля. Механизм возбуждения фонового газа вследствие взаимодействия типа волна-частица вполне может реализовываться в условиях эксперимента. Однако в будущих исследованиях целесообразно предусмотреть возможность прямой регистрации соответствующих агентов передачи энергии.

Анализ динамики изменения спектрального состава плазменных потоков и внешней картины разлета в разных временных и пространственных масштабах и при разных инжекциях показал единый процесс

их развития: первоначальный разлет чистой высокоскоростной алюминиевой плазмы с последующим ее смешиванием (по крайней мере на переднем фронте) с возбужденными атомами окружающей среды, которые и определяют основной высвет плазмы.

Итоги и результаты многочисленных активных экспериментов продолжают оставаться предметом обсуждений научной общественностью. В сентябре 2017 г. в Санта-Фе, Нью-Мексико, США прошла научная конференция под названием «Активные эксперименты в космосе: Прошлое, Настоящее и будущее» [Delzanno et al., 2020]. Основная цель семинара состояла в том, чтобы обсудить идеи и концепции, которые могли бы способствовать развитию активных космических экспериментов. Выводы, к которым пришли участники дискуссии, продолжают оставаться актуальными. При обсуждении прорывных технологий, способных вывести ракетные эксперименты на новый уровень, предлагалось их эффективное объединение с активно развивающейся технологией наноспутников (микроспутников) или кубсатов. Возможность использования малогабаритных диагностических аппаратов, оборудованных анализаторами частиц, магнитометрами и поясами Роговского, установленных на заданном расстоянии от плазменной струи как на пути ее распространения, так и вдоль силовых линий геомагнитного поля на расстояние порядка 1 км, позволило бы решить эту задачу.

Успех проведенных экспериментов Fluxus и NS позволяет рассматривать развитие и/или расширение сценариев будущих исследований с учетом уже реализованных в них возможностей. В настоящее время для будущих экспериментов рассматривается схема использования новых типов носителей, использование комплектов плазменных генераторов, позволяющее увеличить энергию и массу плазменного образования, в том числе за счет создания встречных плазменных потоков различного состава, которые могут инициироваться одновременно или с заданной задержкой в зависимости от задач эксперимента и заданного спектра излучения (УФ, рентген, сверхжесткое рентгеновское излучение).

Прогресс в развитии ракетно-космической техники, новых диагностических методов и приборов должны послужить стимулом и основанием для проведения новых, более совершенных активных экспериментов в космическом пространстве.

### Финансирование

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900175-6).*

### Список литературы

Адушкин В.В., Зецер Ю.И., Киселев Ю.Н., Немчинов И.В., Христофоров Б.Д. Активные геофизические эксперименты с инъекцией высокоскоростной плазменной струи в ионосфере // Доклады АН. 1993. Т. 331. № 4. С. 486–489.

Адушкин В.В., Артемьев В.И., Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Киселев Ю.Н., Поклад Ю.В. Исследование реакции ионосферы на инъекцию высокоскоростной плазменной струи в активных геофизических ракетных экспериментах. В сб.: Динамические процессы в геосферах: геофизика сильных возмущений. М.: Наука. 1994. С. 220–228.

Гаврилов Б.Г., Подгорный А.И., Подгорный И.М., Собянин Д.Б. Доальфвеновские потоки плазмы в короне – численное и лабораторное моделирование // Изв. Академии наук: Серия физическая. 1996. Т. 60. № 8. С. 104–111.

Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Подгорный И.М., Собянин Д.Б., Менг Ч.И., Эрландсон Р.Е., Стейнбек-Нилсен Х.К., Пфафф Р.Ф., Линч К.А. Движение плазменной струи поперек геомагнитного поля в активном геофизическом эксперименте «NORTH STAR» // Космические исследования. 2003. Т. 41. № 1. С. 33–45. <https://elibrary.ru/ooboqf>

Данжи Дж. Космическая электродинамика. М.: Атомиздат. 1961. – 215 с.

- Железняков А., Розенблюм Л. Ядерные взрывы в космосе // Новости космонавтики. 2002. № 9. С. 236.
- Зецер Ю.И., Козлов С.И., Рыбаков В.А., Пономаренко А.В., Смирнова Н.В. и др. Свечение в видимом и инфракрасном диапазонах спектра возмущенной верхней атмосферы в условиях инъекции высокоскоростной плазменной струи. I. Экспериментальные данные // Космич. исслед.. 2002. Т. 40. № 3. С. 252–260.
- Зецер Ю.И., Гаврилов Б.Г., Жмайло В.А., Гайнуллин К.Г., Селин В.И. Геомагнитные эффекты от расширяющегося плазменного образования высотного ядерного взрыва // Физика горения и взрыва. 2004. № 6. С. 31–41. <https://elibrary.ru/hrpeab>
- Зецер Ю.И. Участие Спецсектора Института химической физики АН СССР в ядерных испытаниях по «Атомному проекту» // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 3. С. 103–124. [https://doi.org/10.26006/29490995\\_2023\\_15\\_3\\_103](https://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_3_103)
- Ковалева И.Х., Ковалев А.Т., Зецер Ю.И. Формирование магнитозвуковой нелинейной структуры на фронте расширяющегося плазменного потока // Динамические процессы в геосферах: сб. научн. тр. ИДГ РАН. Вып. 12. М. : 2020. ИДГ РАН. С. 140. <https://doi.org/10.26006/IDG.2020.84.15.013>
- Лосева Т.В., Голубь А.П., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н. Характеристики плазменной струи взрывного генератора в экспериментах «Флакрус»: измерения и численное моделирование // Динамические процессы в геосферах. 2021. № 13. М. : ИДГ РАН. С. 175–186. [https://doi.org/10.26006/22228535\\_2021\\_1\\_175](https://doi.org/10.26006/22228535_2021_1_175)
- Райзер Ю.П. О торможении и превращениях энергии плазмы, расширяющейся в пустом пространстве, в котором имеется магнитное поле // ПМТФ. 1963. № 6. С. 19–28.
- Садовский М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. М. : Наука. 2004. – 440 с.
- Урвачев Е.М., Лосева Т.В., Ляхов А.Н. Численное моделирование истечения в вакуум высокоскоростных плазменных струй // Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 11. С. 1118–1126. <https://doi.org/10.31857/S0367292123601145>
- Baumjohann W. et al. Characteristics of high-speed ion flows in the plasma sheet // J. Geophys. Res. 1990. Vol. 95 (A4). P. 3801–3809. <https://doi.org/10.1029/JA095iA04p03801>
- Bernhardt P.A. Probing the magnetosphere using chemical releases from the Combined Release and Radiation Effects Satellite // Phys. Fluids. 1992. Vol. B4 (7) P. 2249–2256. <https://doi.org/10.1063/1.860193>
- Delamere P., Stenbaek-Nielsen H., Pfaff R., Erlandson R., Meng C., Zetzer J., Kiselev Y., Gavrilov B.G. Dynamics of the Active Plasma Experiment North Star Artificial Plasma Jet // Journal of Spacecraft and Rockets. 2004. Vol. 41 (4). P. 503–508. <http://dx.doi.org/10.2514/1.12141>
- Delzanno G.L., Borovsky J.E., Mishin E.V. Active Experiments in Space: Past, Present, and Future. Lausanne: Frontiers Media SA. 2020. <https://doi.org/10.3389/978-2-88963-659-4>
- Erlandson R.E., Swaminathan P.K., Meng C.-I. et al. Observation of auroral emissions induced by artificial plasma jets // Geophysical Research Letters. 1999. Vol. 26 (11). P. 1553–1556. <http://dx.doi.org/10.1029/1999GL900282>
- Erlandson R.E. et al. The APEX North Star experiment: observation of the high-speed plasma jets injected perpendicular to the magnetic fields // Adv. Space Res. 2002. Vol. 29. P. 1317–1326. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00183-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00183-7)
- Gavrilov B.G., Podgorny A.I., Podgorny I.M., Zetzer J.Y. The investigation of the field-aligned current generation during the injection of plasma jet into the magnetosphere // Geomagnetism and Aeronomy. 1994. Vol. 34 (5). P. 6.
- Gavrilov B.G., Kiselev Y.N., Podgorny I.M., Sobyenin D.B., Zetzer J.I., Erlandson R.E., Meng C.-I. Dynamics of a high energy plasma jet in space: in situ experiment and laboratory simulation // Advances in Space Research. 1998. Vol. 21 (5). P. 773–776. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)01023-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01023-5)
- Gavrilov B.G. et al. North Star Plasma-Jet Experiment Particles and Electric and Magnetic Field Measurements // Journal of Spacecraft and Rockets. 2004. Vol. 41 (4). P. 490–495. <https://doi.org/10.2514/1.11948>
- Gavrilov B.G. How do field-aligned currents influence plasma flows? Laboratory and space plasma experiments // Advances in Space Research. 2021. Vol. 68 (4). P. 1890–1901. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.030>

- Fuselier S.A. et al.* Dynamics of the CRRES barium releases in the magnetosphere // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99 (A9). P. 17379–17390. <https://doi.org/10.1029/94JA01099>
- Haerendel G.* Experiments with plasmas artificially injected into near-Earth space // Front. Astron. Space Sci. 2019. Vol. 6 (29). <https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00029>
- Iijima T., Potemra T.A.* The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad // J. Geophys. Res. 1976. Vol. 81 (A13). P. 2165–2174. <https://doi.org/10.1029/JA081i013p02165>
- Lynch K.A. et al.* Active Plasma Experiment: North Star Particle Data // Journal of Spacecraft and Rockets. 2004. Vol. 41 (4). P. 496–502. <https://doi.org/10.2514/1.11947>
- Kovaleva I.Kh., Kovalev A.T.* High frequency fluctuations in an active ionospheric experiment. Proc. SPIE: 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics (15 December 2021). Atmospheric Physics. 2021. P. 119167U. <https://doi.org/10.1117/12.2603335>.
- Mill J.D., O'Neil R.R., Prace S. et al.* Midcourse Space Experiment: Introduction to the Spacecraft. Instruments. and Scientific Objectives // Journal of Spacecraft and Rockets. 1994. Vol. 31(5). P. 900–907. <https://doi.org/10.2514/3.55673>
- Papadopoulos K., Mankofsky A., Davidson R.C., Drobot A.* Ballistic cross-field ion beam propagation in a magnetoplasma // Phys. Fluids. 1991. Vol. B3 (4). P. 1075–1090. <https://doi.org/10.1063/1.859836>
- Petrukovich A.A. et al.* Are earthward bursty bulk flows convective or field-aligned? // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106 (A10). P. 21211–21215. <https://doi.org/10.1029/2001JA900019>
- Pfaff R.F. et al.* Electric Field, Magnetic Field and Density Measurements on the Active Plasma Experiment Sounding Rocket // Journal of Spacecraft and Rockets. 2004. Vol. 41 (4). P. 521–532. <https://doi.org/10.2514/1.11945>
- Poklad Yu.V., Gavrilov B.G., Zetzer J.I. et al.* Trigger effect of the afterglow background medium after injection of the high speed plasma jet in the Fluxus and North Star experiments. Proceedings of SPIE: 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. 2018. Vol. 10833. P. 108339H. <https://doi.org/10.1117/12.2504059>
- Shiokawa K. et al.* Braking of high-speed flows in the near-Earth tail // Geophys. Res. Lett. 1997. Vol. 24 (10). P. 1179–1182. <https://doi.org/10.1029/97GL01062>
- Sobyanin D.B., Gavrilov B.G., Podgorny I.M.* Laboratory investigation of plasma jet interaction with transverse magnetic field // Adv. Space Res. 2002. Vol. 29 (9). P. 1345–1349. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00190-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00190-4)
- Swenson C.M. et al.* CRIT II electric, magnetic and density measurements in an ionizing jet // Adv. Space Res. 1992. Vol. 12 (12). P. 65–90. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(92\)90354-Z](https://doi.org/10.1016/0273-1177(92)90354-Z)
- Valenzuela A. et al.* The AMPTE artificial comet experiments // Nature. 1986. Vol. 320 (6064). P. 700–703. <https://doi.org/10.1038/320700a0>
- Zetzer J.I., Gavrilov B.G., Kiselev Yu.N., Rybakov V.A., Gritskiv I.V., Romanovsky Yu.A., Erlandson R.A., Meng C.-I., Stoyanov B.J.* The Fluxus-1 and -2 experiment: Investigation of plasma jet dynamics and interactions with the ionosphere: Proc. 6-th Spacecraft Charging Technology Conference, AFRL-VS-TR-20001578. 2000.

## **EXPERIMENTAL STUDY IN ACTIVE GEOPHYSICAL ROCKET EXPERIMENTS OF PHYSICAL EFFECTS ARISING FROM PLASMA FLOWS IN THE IONOSPHERE AND MAGNETOSPHERE OF THE EARTH**

© 2024 **B. G. Gavrilov\***, **Y. I. Zetser**

*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*\*E-mail: gavrilo@idg.ras.ru*

One of the fundamental problems of astrophysics and geophysics is the study of processes in the external and internal magnetosphere and ionosphere of the Earth related to energy transfer in the system of solar wind - magnetosphere and plasmasphere - ionosphere. The most important agent of energy transfer in this system is plasma flows interacting with the background plasma and magnetic field. Their direct study using spacecrafts is not possible with today's technical capabilities. Under these conditions, active plasma experiments are of paramount importance. This direction is being successfully developed in IDG RAS, and the foundation for setting experiments, development of initial data and the necessary technical and measuring instruments is the experience of many years of research in the field of explosion physics, conducted in the Special Sector of the Institute of Chemical Physics of RAS, and then in the Special Sector of the Institute of Physics of the Earth RAS and in the Institute of Geospheres Dynamics RAS under the leadership of Academician M.A. Sadovsky. The results of the experiments conducted in cooperation with scientific organizations of the Russian Federation and the USA made it possible for the first time in a real geophysical environment to carry out complex multipoint measurements of plasma parameters both inside the plasma flow and remotely. The analysis of the results of the experiments showed that their schemes, parameters of explosive plasma generators, diagnostic equipment allowed to study the most important and still being the subject of active study the effects of interaction of natural ionospheric plasma flows with the background medium and geomagnetic field, their spatial and temporal distribution, main parameters and results of influence on the geophysical environment.

**Keywords:** ionosphere, magnetosphere, plasma flows, geomagnetic field, longitudinal currents, active rocket geophysical experiments.