

ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В ИОНОСФЕРЕ

© 2021 г. Б. Г. Гаврилов¹, *, Ю. В. Поклад¹

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: boris.gavrilov34@gmail.com

Поступила в редакцию 26.02.2021 г.

После доработки 28.03.2021 г.

Принята к публикации 01.04.2021 г.

Возникновение и эволюция плазменных потоков в ионосфере являются одним из факторов, оказывающих существенное влияние на динамику и состояние геофизической среды. Изучение плазменных и магнитогидродинамических эффектов, возникающих при движении плазменных струй в реальном космосе, затрудняется масштабом явления и сложным характером фоновой среды, представляющей собой сложную нестационарную систему взаимодействующих нейтральных и частично или полностью замагниченных заряженных частиц. Создание теоретических моделей этого явления также является сложной и нерешенной в полной мере научной задачей. В этих условиях важное значение приобретает проведение контролируемых ионосферных плазменных экспериментов. Полученные за последние несколько десятилетий результаты активных ракетных экспериментов 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. В статье обсуждаются современные физические представления, полученные в результате анализа имеющихся экспериментальных данных, а также задачи и возможности проведения новых активных экспериментов.

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

DOI: 10.31857/S0002333721050045

ВВЕДЕНИЕ

Плазменные потоки (ПП) разного масштаба, плотности, состава, скорости, времени существования являются одним из основных элементов космического пространства, магнитосферы Земли и планет, ионосферы и атмосферы. Их возникновение, движение, эволюция и распад, оказывающие огромное влияние на процессы в окружающей среде, одна из фундаментальных проблем астрофизики и геофизики. Само образование магнитосферы есть результат взаимодействия потока солнечной корональной плазмы и геомагнитного поля. 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. В пограничном слое поток плазмы, направленной поперек магнитного поля, индуцирует поле $-\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$, что приводит к генерации пар продольных токов на утренней и вечерней сторонах магнитосферы. Каждая пара токов замыкает-

ся в полярной ионосфере вдоль границы раздела замкнутых линий магнитного поля и линий, уходящих в хвост.

Экспериментальное исследование токов в пограничной области чрезвычайно затруднено, сами продольные токи очень чувствительны к быстро меняющемуся межпланетному магнитному полю, в результате чего морфология и роль пограничных продольных токов остается недостаточно изученными. Слишком трудно обеспечить одновременное расположение большого количества космических аппаратов в критически важных точках лобовой части и геомагнитного хвоста, чтобы зарегистрировать генерацию полей и токов при инъекции плазмы и их связь с процессами в головной части магнитосферы. Между тем изучение продольных токов, генерируемых плазменной струей при магнитной буре, необходимо для понимания физики захвата плазмы в кольцевой ток. Механизмом захвата заряженных частиц в кольцевой ток является, по-видимому, торможение струи плазмы, передающей импульс ионо-

сфере через продольные токи. Токи генерируются электрическим полем Холла, направленным к Земле вдоль хвоста. Это поле $E = \frac{j \times B}{nec}$ возникает из-за потока электронов, переносящего ток в токовом слое магнитного хвоста. Создается цепь, в которой продольные токи замыкаются в ионосфере за счет проводимости Педерсена, и возникает электроджет, обусловленный проводимостью Холла. Усиление западного электроджета, связанное с возрастанием величины продольных токов, является главным магнитным возмущением в полярной ионосфере.

Взаимодействие потоков плазмы с геомагнитным полем вызывает ряд эффектов в окружающей среде, которые могут оказывать существенное влияние на энергетические характеристики, состояние и динамику ионосферы и верхней атмосферы Земли. Сложность исследования этих процессов в реальной космической обстановке приводит к тому, что вопрос об изменении параметров ионосферы Земли, которое может иметь место в результате джоулева разогрева и ионизации ионосферы на высотах ~100 км при протекании в этой области педерсеновских токов или при высыпании высокоэнергичных электронов, ускоренных в слоях продольных токов вдоль магнитных силовых линий, остается малоизученным. Плазменные потоки могут возникать и оказывать воздействие на процессы в магнитосфере и ионосфере также при входе в магнитосферу Земли крупных метеоритов, стартах ракет, высотных взрывах. Одним из основных каналов передачи энергии, импульса и вещества из магнитосферы в нижние слои ионосферы являются продольные токи (ПТ), текущие вдоль силовых линий геомагнитного поля [Kamide, Baumjohann, 1993]. В плазмосфере и хвосте магнитосферы ПТ вызывают ускорение заряженных частиц, нагрев и движение ионосферы и другие эффекты, наблюдаемые в авроральных областях Земли при магнитных бурях и суббурях. Эти эффекты исследованы и описаны в многочисленных работах [Альвен, 1983; Angelopoulos et al., 1992; Данжи, 1961; Baumjohann et al., 1990; Petrukovich et al., 2001; Ly-sak, 1985; Iijima, Potemra, 1976; Sergeev et al., 2000; Shiokawa et al., 1997; Зецер и др., 2004]. В меньшей степени исследовано влияние ПТ на динамику и эволюцию самих плазменных потоков. Очевидно, что генерация ПТ токов должна приводить к диссипации энергии и торможению магнитосферной плазмы и влиять на динамику плазменных потоков, в том числе инжектируемых из хвоста магнитосферы. Имеющиеся сегодня представления и теоретические модели, описывающие динамику спорадических плазменных потоков в хвосте магнитосферы, до сих пор не имеют прямых экспериментальных подтверждений. В то же время, количественное изучение и моделирование этого

физического эффекта может быть достаточно эффективным в условиях контролируемых лабораторных и ионосферных плазменных экспериментов.

За последние десятилетия проведено множество активных космических экспериментов с инжекцией нейтрального газа, потоков плазмы или пучков заряженных частиц [Адушкин и др., 1993; Bernhardt et al., 1987; Delamere et al., 1996; Dimonte, Wiley, 1991; Fuselier et al., 1994; Pilipenko et al., 2005; Scholer, 1970; Swenson et al., 1992; Valenzuela et al., 1986]. Их возможности были в определенной степени ограничены тем, что измерения проводились в одной или двух точках, что не позволяло получать надежные данные по эволюции и динамике плазменных потоков и процессов, сопровождающих движение плазмы в окружающей среде.

Можно выделить несколько наиболее существенных физических проблем, возникающих при изучении процессов возникновения и эволюции ПП и их взаимодействия с окружающей средой. К ним относятся вытеснение движущейся плотной плазмой магнитного поля, электрическая поляризация плазмы, возникновение ПТ и их воздействие на динамику (торможение) ПП, генерация плазменных и электромагнитных волн, нагрев, возбуждение и ионизация фонового газа, диффузия внешнего магнитного поля в плазменное образование, эволюция замагниченной плазмы.

Статья посвящена обсуждению этих вопросов, а также методам и результатам их исследования в активных ракетных плазменных экспериментах, которые способны в определенной степени способствовать развитию соответствующих научных представлений.

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 плазменного потока к плотности энергии

магнитного поля $\beta = n_i m_i V^2 / \left(\frac{B^2}{8\pi} \right)$, где n_i , m_i и V –

концентрация, масса и скорость ионов струи и B – индукция магнитного поля. В зависимости от соотношения плотности плазменного потока и окружающего газа, и величины параметра β могут быть рассмотрены несколько сценариев взаимодействия [Gavrilov et al., 1995].

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 движется поперек магнитного поля по прямолинейной траектории. Присутствие фоновой плазмы приводит к генерации альфвеновских волн, распространяющихся вдоль магнитного поля. Альфвеновская волна переносит ток $i = (c^2/4\pi V_A)E$, где V_A – альфвеновская скорость. В пространстве между парой листов продольных противоположно направленных 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; 1998].

Эти сценарии могут наблюдаться при движении ПП, имеющих соответствующие параметры, достаточно продолжительное время или, как это происходило в большинстве космических плазменных экспериментов, реализовываться как последовательные стадии эволюции плазменной струи в магнитном поле.

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. 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], сценарии и измерительные возможности которых были специально разработаны для исследования различных стадий взаимодействия плазменных потоков различной плотности в ионосфере. Перечисленные выше сценарии эволюции скоростных плазменных струй в магнитном поле рассматриваются ниже на примере результатов этого эксперимента с привлечением данных других космических экспериментов с инъекцией плазмообразующих веществ в ионосферу Земли.

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 наиболее полную плазменную диагностику поведения плотных доальфвеновских плазменных струй с $\beta > 1$ и $\beta < 1$, инжектированных в ионосферу Земли перпендикулярно силовым линиям геомагнитного поля. Получены данные по аномальной диффузии, структуре фронта диамагнитной каверны, магнитогидродинамическим возмущениям в фоновой плазме и поляриационным электрическим полям в плазменной струе, генерирующей продольные токи.

Было осуществлено две инъекции на высотах 360 и 280 км. В эксперименте удалось получить данные по динамике и эволюции плазменного потока, 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 22.01.1999 г. на полигоне Poker Flat. 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.

В качестве источников плазменной струи использовались взрывные генераторы плазменной струи, установленные на модулях ETG-1 и ETG-2. В генераторах [Адушкин, 2000] используется принцип испарения твердого пористого вещества и ускорения паров сходящейся к оси ударной волной, возбуждаемой взрывом заряда мощного взрывчатого вещества. В качестве рабочего вещества использовался пористый алюминий. 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° [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. Несмотря на то, что механизм роста ионизации движущейся плазмы при ее взаимодействии с фоновым нейтральным газом остается не до конца изученным, 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. При этом использовался генератор плазмы, установленный на модуле ETG-2. В отличие от перво-

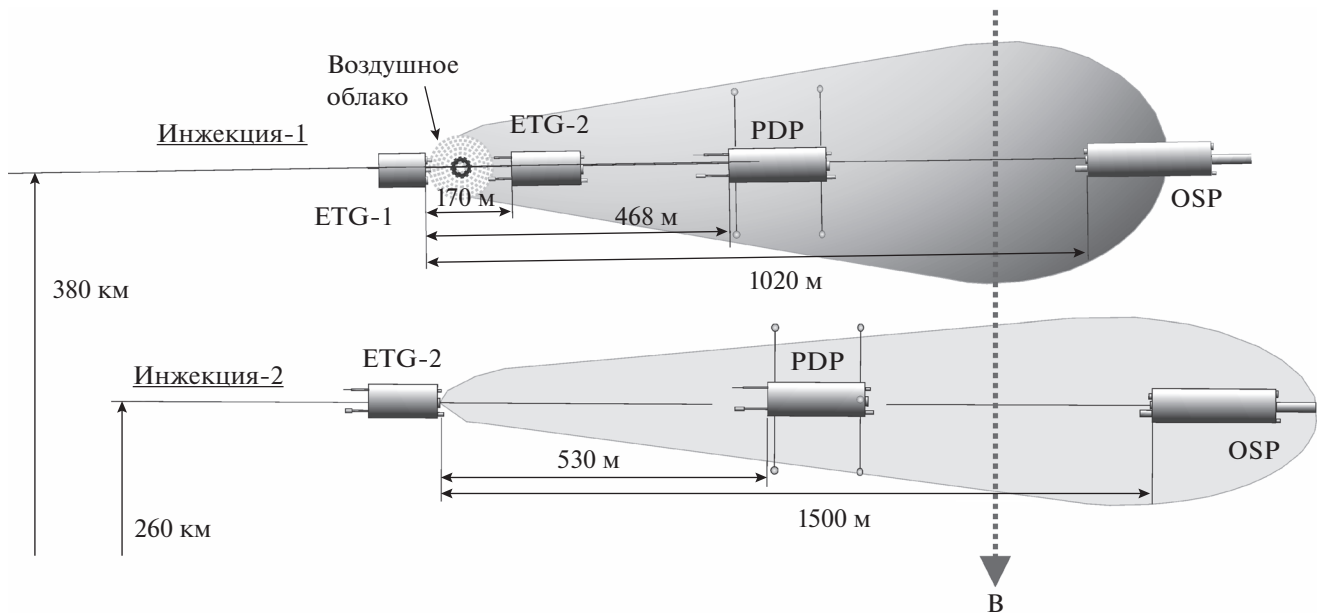


Рис. 1. Схема проведения эксперимента NS.

го эксперимента И-2 проводилась в естественной атмосфере.

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 $\sim 7 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$. Значительный рост концентрации плазмы на расстоянии 170 м от источника струи регистрируется через 4 мс после детонации взрывного генератора, что соответствует скорости прихода плазмы $\sim 42 \text{ км/с}$. Максимум плотности плазмы $\sim 3 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$ достигается на 7 мс. Далее n_i постепенно снижается. Датчиками модуля ETG-2 зарегистрирована только вариация Y-компоненты магнитного поля, перпендикулярной направлению невозмущенного магнитного поля в момент инъекции.

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 мо-

менту 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 $n_i = 4 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$ 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%. Оценка плотности плазмы из баланса давлений на границе диамагнитной полости согласуется в пределах погрешности измерений с данными зондов Ленгмюра.

На рис. 3 изменение концентрации плазмы и магнитного поля в струе показано 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 может быть связано с формированием оболочечной структуры плазменного сгустка. Формирование плазменной

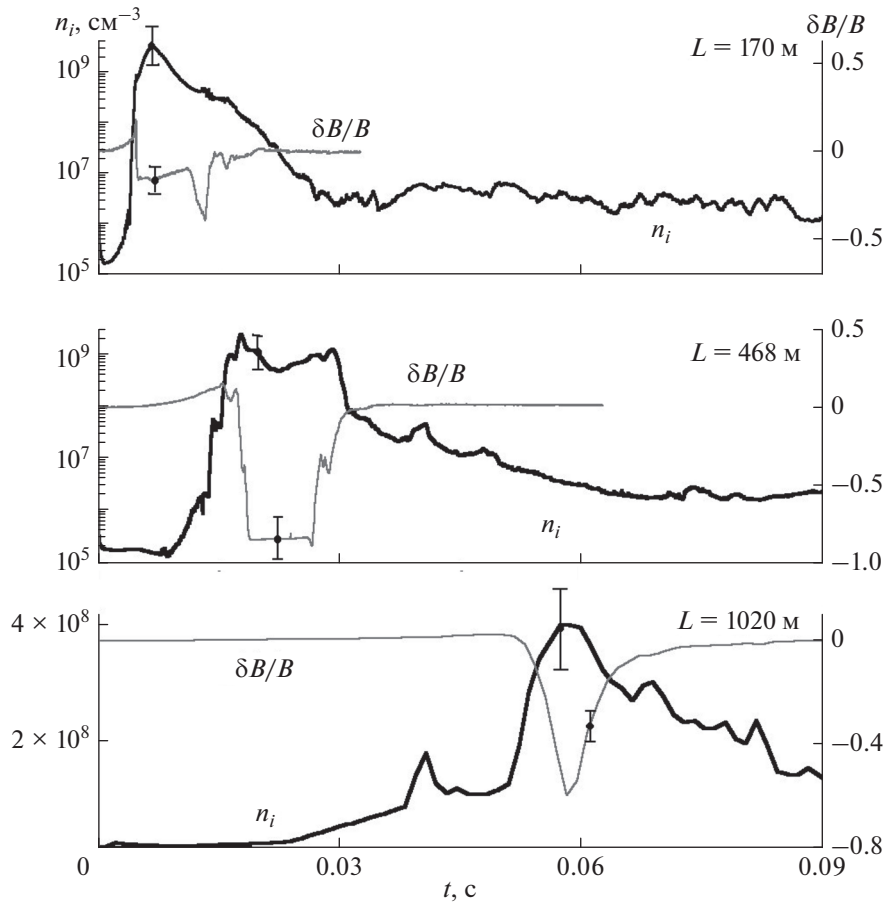


Рис. 2. Эксперимент NS И-1. Концентрация плазмы (толстая кривая) и изменение магнитного поля (тонкая кривая) на расстоянии 170 м (верхняя панель), 468 м (средняя панель) и 1020 м (нижняя панель) от плазменного генератора.

оболочки в движущейся плазме с $\beta > 1$ наблюдались в космическом эксперименте AMPTE [Bernhardt, 1987] и при численном моделировании [Papadopoulos, 1991].

В работе [Райзер, 1963] 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:

$$n_i m_i V^2 + \frac{B_i^2}{8\pi} = \frac{B_0^2}{8\pi}, \quad (1)$$

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 $2 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$, что хорошо согласуется с данными зондовых измерений. Границы каверны совпадают с областью концентрации ионов $n_i = 5 \times 10^8 - 3 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$.

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 ~ 17 мс E_y быстро уменьшается до нуля (внутри диамагнитной полости) и остается таким до $t \sim 33$ мс. Далее магнитное поле про-

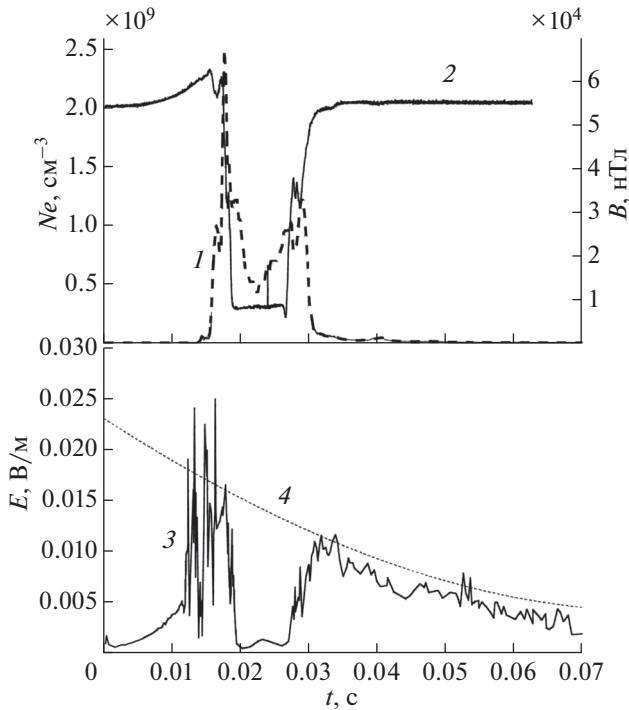


Рис. 3. Результаты измерений плотности плазмы (1), вариаций магнитного поля (2), электрического поля в струе (3) и расчетное значение электрического поля (4) на расстоянии 468 м от генератора плазмы в эксперименте NS И-1.

никает 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 $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$, где \mathbf{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 $5 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$ показывает, что скорость переднего фронта падает на расстоянии порядка 1 км примерно в два раза, в то время как скорость заднего фронта струи остается 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:

$$m_i dV_i/dt = eE + e(V_i \times B)/c + (V_e - V_i)m_e/\tau, \quad (2)$$

$$m_e dV_e/dt = -eE - e(V_e \times B)/c - (V_e - V_i)m_e/\tau. \quad (3)$$

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

Возможное 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 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 [Гаврилов и др., 1994]. 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, отраженных 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 не только зондами Ленгмюра, но и электростатическими электронным (MESA и SESA) и ионным анализаторами (IESA) [Lynch et al., 2004]. Прибор позволял получить данные не только по энергии, но и по pitch-угловому распределению заряженных частиц. Интерпретация всей совокупности данных, полученных этими приборами, не входит в задачу настоящей статьи. Отметим только, что ионы, двигавшиеся навстречу плазменному потоку, были реально обнаружены в эксперименте.

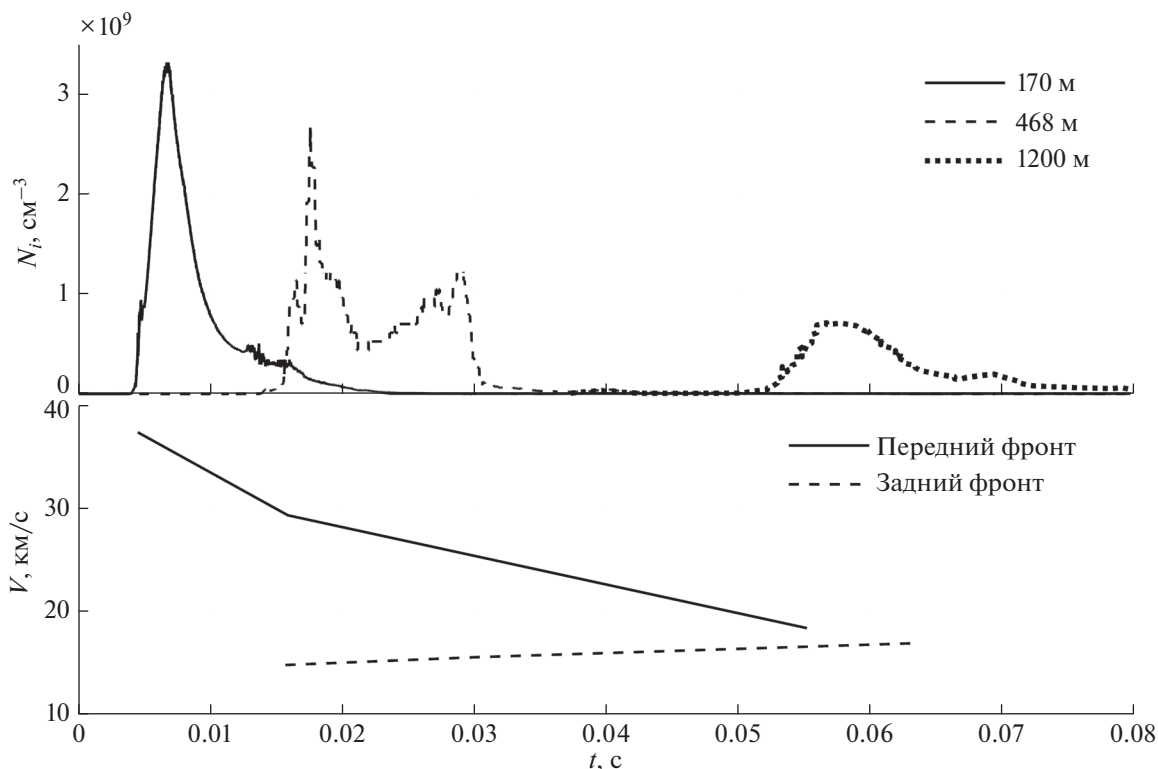


Рис. 4. Результаты измерений плотности плазмы в эксперименте И-1 на разных расстояниях от инжектора (верхняя панель) и скорости переднего и заднего фронтов плазменного сгустка на уровне концентрации $5 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$ (нижняя панель).

Таким образом, возможность потери кинетической энергии потока в результате воздействия отражения от движущегося фронта диамагнитной каверны заряженных частиц может рассматриваться как реальный механизм торможения плазмы в эксперименте И-1.

Совершенно другая динамика плазменной струи наблюдалась в эксперименте И-2. Отметим, что скорости плазменного потока в И-1 и И-2 на дистанции ~ 500 м оказались практически равны, несмотря на то, что концентрация плазмы в И-2 оказалась на два порядка ниже, чем в И-1 (рис. 5). 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, отсутствовала. На пути в 1 км концентрация плазмы падает примерно на порядок.

Данные измерений концентрации ионов зондами Ленгмюра и магнитного поля в струе показывают (рис. 6), что на расстоянии 537 м плазменная струя практически полностью промагнитчена. Степень вытеснения магнитного поля в струе определяется концентрацией ионов и температурой плазмы. В И-2 максимальная плотность плазмы равна $n_i = 4 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$. Если ослабление маг-

нитного поля невелико, 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 $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$, где $\mathbf{V} = L/t$ – времяпролетная скорость, $L = 537$ м – расстояние до плазменного генератора. С 26 мс регистрируется поле E_y положительной полярности, связанное с движением плазменной струи с $\beta < 1$ поперек магнитного поля. Экспериментальное и расчетное значение поля в этот момент времени практически совпадают. Далее поперечное электрическое поле в струе оказывается

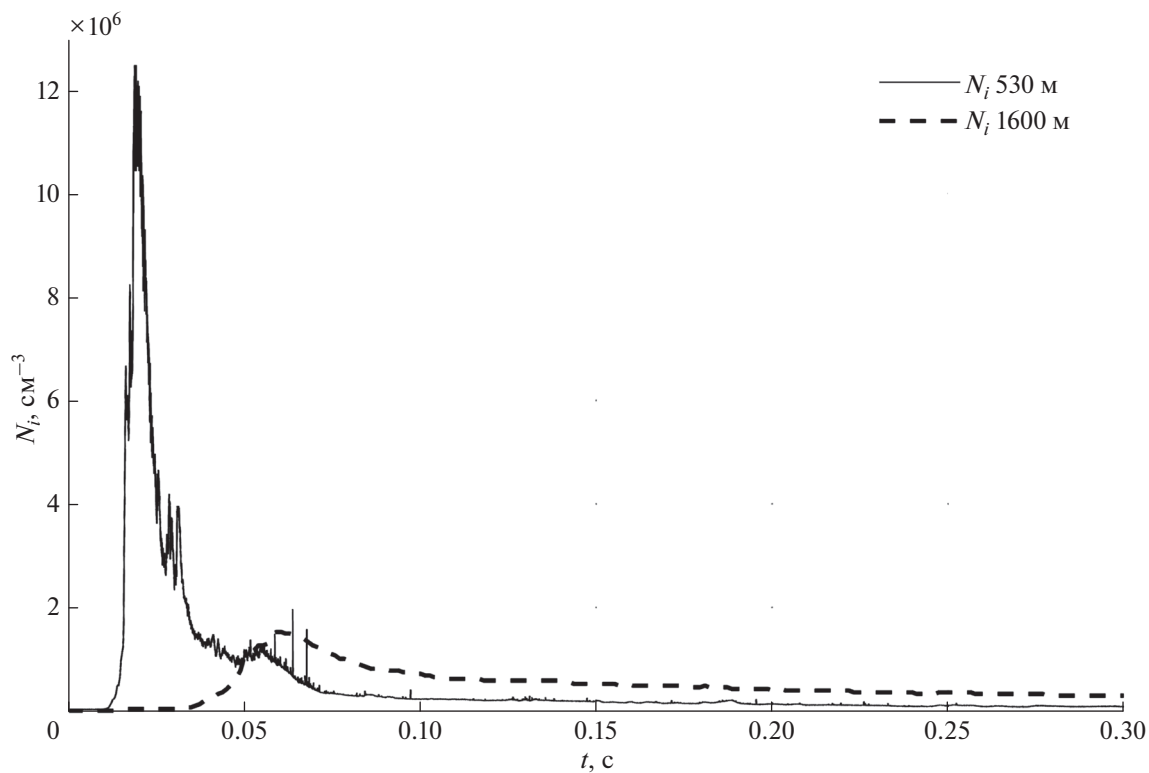


Рис. 5. Результаты измерений плотности плазмы в эксперименте И-2 на расстоянии 530 и 1600 м от инжектора.

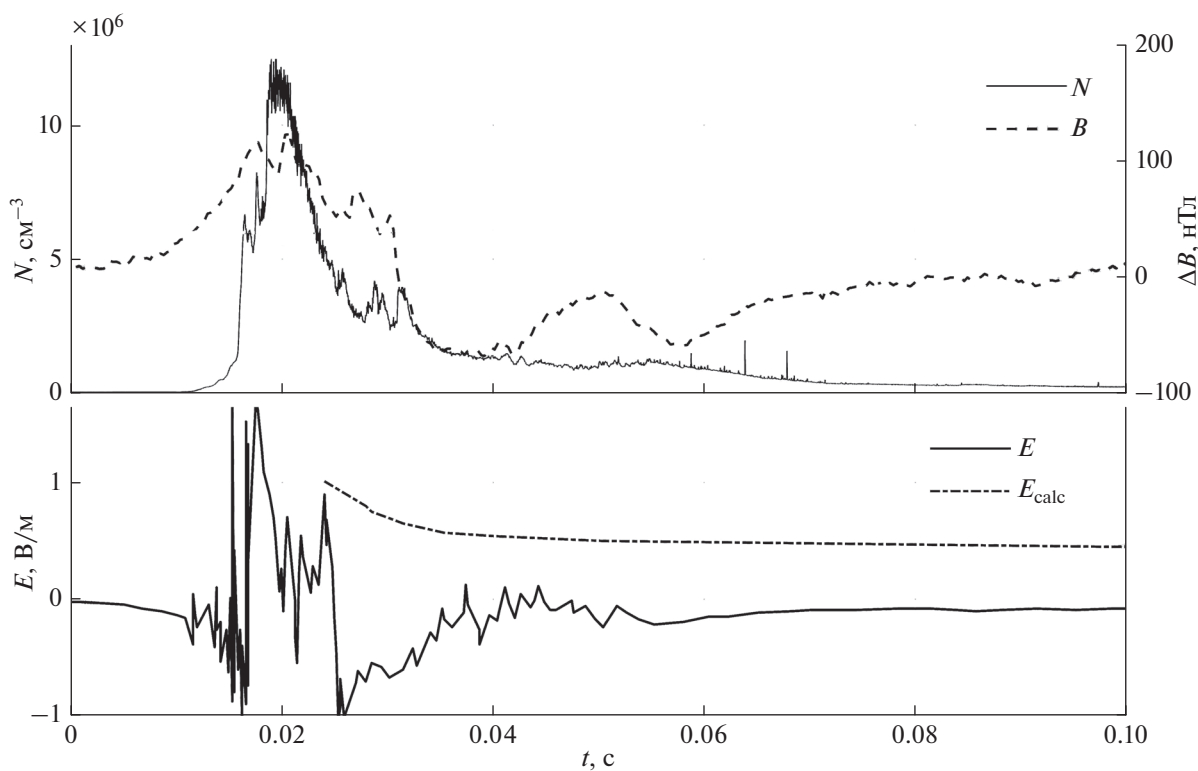


Рис. 6. Результаты измерений плотности плазмы N , вариаций магнитного поля в струе B , электрического поля в струе E и расчетного значения электрического поля E_{calc} на расстоянии 530 м от генератора плазмы в эксперименте NS И-2.

меньше значения VB/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 ~ 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. Таким образом, значение t_A существенно превышает время наблюдения струи на измерительных модулях в эксперименте Инжекция-2. 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.

Аналогичный эффект (“скиддинг-эффект”) был зарегистрирован в эксперименте CRRES [Bernhardt, 1992; Delamere, 1996], во время которого было проведено несколько инъекций бария на высотах 400–500 км поперек геомагнитного поля в дневных условиях. Было обнаружено, что плазменное облако проходит необычайно большой путь (до 100 км) поперек магнитного поля [Delamere, 2000]. По мнению авторов, заметно меньший путь струи по данным расчетов объясняется существованием продольных электрических полей в слоях продольных токов. Появление продольных электрических полей приводит к уменьшению продольных токов, а следовательно, к уменьшению эффективности механизма передачи энергии от струи к ионосфере [Borovsky, Bonnel, 2001]. Причиной появления продольных полей может быть развитие неустойчивостей, инерция электронов, появление аномальной проводимости.

Слабая эффективность торможения в Инжекции-2 может быть также обусловлена присутствием в плазменном потоке большого количества нейтралов, которые в процессе резонансной пе-

резарядки 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.

Зафиксированная в эксперименте сильная деполяризация струи (нижняя панель рис. 6) могла привести к отклонению плазменного потока. Измерения показывают, что по данным зондов Ленгмюра плотная часть струи прошла 1600 м в направлении инъекции. Тем не менее, в менее плотных периферийных частях струи эффективная деполяризация могла наблюдаться. На рис. 7 показаны интегральные потоки ионов, имеющих составляющую скорости в направлении инъекции и в обратном направлении по данным измерений анализатором IESA [Lynch et al., 2004]. Наблюдается периодичность значения потока обратного направления ~ 20 и ~ 40 мс. Эти периоды близки к гиропериоду иона алюминия $T_{ci} = 35$ мс. С 50 мс потоки ионов в прямом и обратном направлении становятся сравнимы, а на 80 мс ионы двигаются преимущественно в обратном направлении. Не исключено, что источником периодически повторяющегося потока частиц, движущихся в обратном направлении, могут быть ионы периферийных частей струи низкой плотности, где эффективность деполяризации достаточно высока. Эти ионы совершают коллективное ларморовское вращение и уходят из струи по спиральной траектории вдоль магнитных силовых линий.

В работе [Brenning, 1991], посвященной результатам эксперимента CRIT, такой эффект наблюдался и получил название “бариевый рои”. В этих экспериментах, также как в эксперименте NS, И-2 поперечная к вектору скорости компонента E_y оказалась меньше значения $E = VB/c$ [Kelley, 1991]. В результате, ток в струе был направлен под углом к вектору скорости. Суммарная сила Ампера должна тормозить плазменный сгусток и отклонять его от направления инъекции. В условиях экспериментов CRIT это приводило к коллективному вращению инжектированных частиц вокруг силовых линий магнитного поля с гирочастотой ионов.

Анализ питч-углового распределения электронов в эксперименте NS И-1 показал, что в каналах с энергией 1581 и 727.5 эВ ловушкой, направленной вдоль магнитного поля, зарегистрированы всплески потока электронов через 1–1.5 с после инъекции (рис. 8). Причиной их появления может быть высыпание частиц, вызванное распространением в ионосфере МГД возмуще-

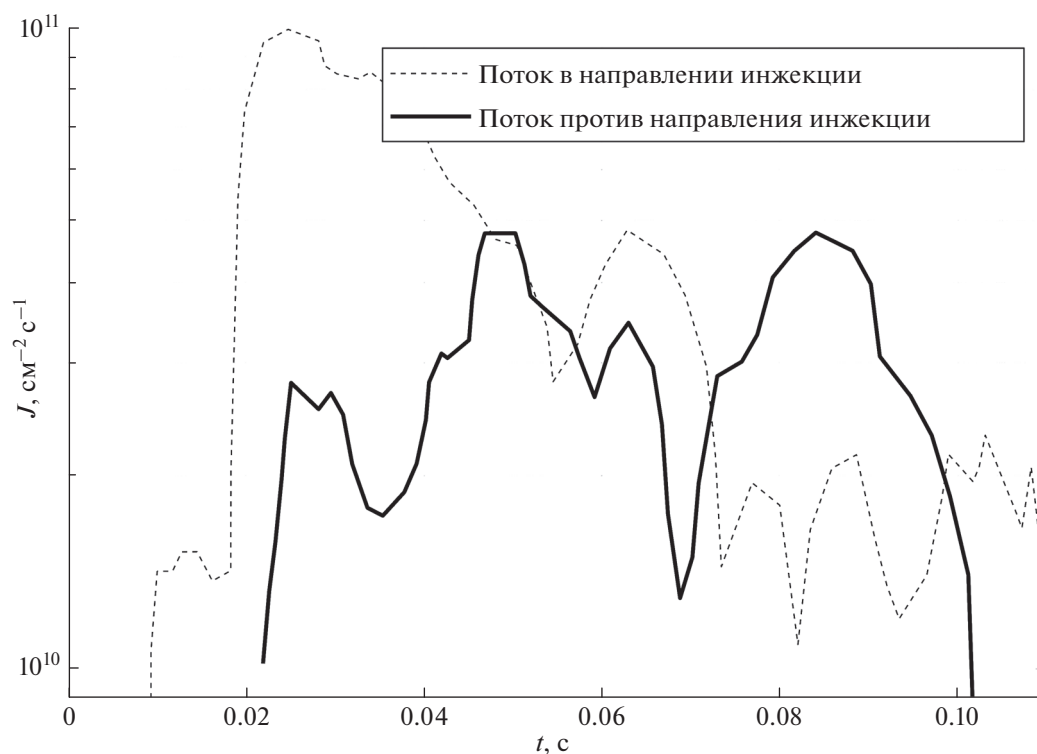


Рис. 7. Эксперимент NS И-2. Интегральные потоки ионов, движущихся в направлении инъекции и в обратном направлении по данным ионного анализатора IESA на расстоянии 537 м от плазменного генератора.

ния, стимулированного инъекцией плазменной струи.

Возможным подтверждением этой версии является обнаруженное шелевыми спектрографами SPIM, установленными на спутнике MSX [Mill et al., 1994], с которого велось наблюдение эксперимента с расстояния 2500–3000 км, увеличение интенсивности свечения за пределами зоны инъекции в тот же момент времени (рис. 9). Наиболее интенсивное свечение наблюдалось на длинах волн 628.7 и 634.5 нм, близких к линии атомарного кислорода. Спустя 1 с после инъекции яркость свечения возрастает примерно в 3–3.5 раза. Свечение могло быть вызвано ионизацией фонового газа потоком высыпавшихся электронов [Poklad et al., 2018].

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 то же время естественные ограничения адекватного масштабирования сложной системы распространения плазмы в атмосферно-ионосферно-магнитосферной системе и магнитном поле являются препятствием для полноценного лабораторного моделирования.

В течение ряда десятилетий большие надежды возлагались на проведение активных экспериментов в ионосфере и магнитосфере. Действительно, эти эксперименты предоставили большое количество важной информации о механизмах взаимодействия плазмы и фоновой среды. 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]. Итоги и результаты многочисленных активных экспериментов продолжают оставаться предметом обсуждения научной общественности. 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 возобновлению и развитию активных космических экспериментов. Участники констатировали

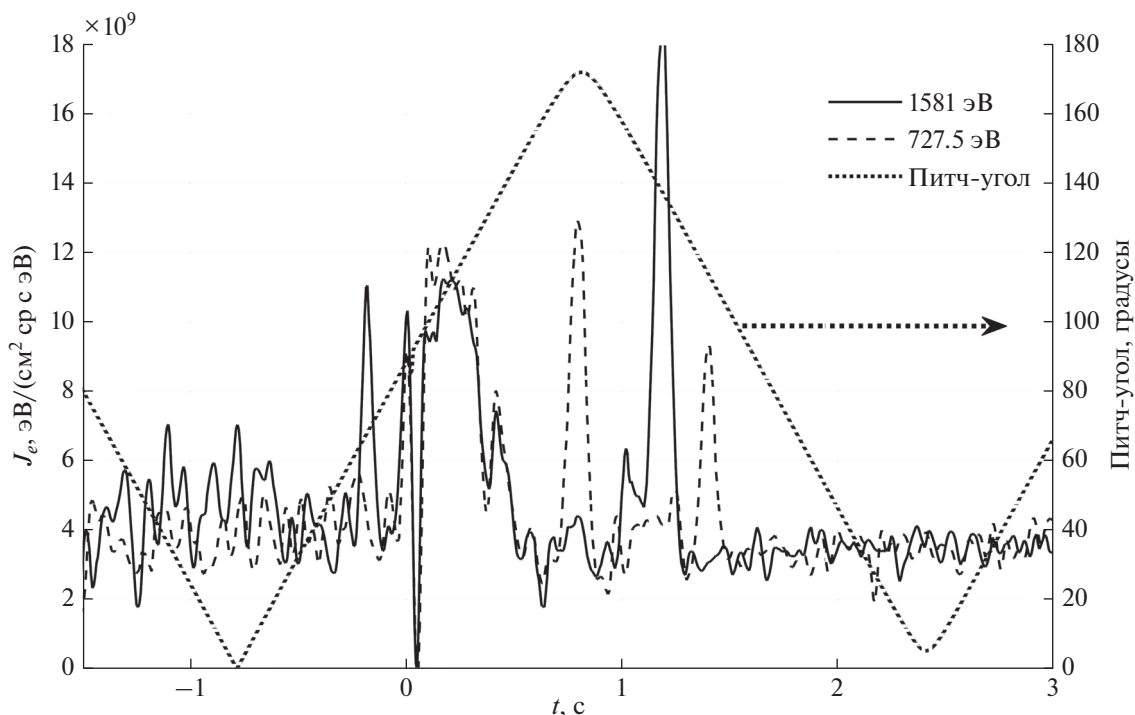


Рис. 8. Поток электронов и питч-угол ловушки электронного анализатора SESA в эксперименте NS И-1. По горизонтальной оси показано время относительно момента инъекции.

снижение интереса к таким исследованиям и попытались разобраться в его причинах. Среди главных были названы сложность активных экспериментов и возрастание их стоимости, кратковременность экспериментов и относительно небольшой объем научных данных, который удается получить при затрате значительных ресурсов. Тем не менее, участники пришли к выводу о целесообразности возобновления экспериментов. Для этого должны быть определены научные вопросы, на которые можно ответить только с помощью активных экспериментов, расширение сферы применения их результатов на другие области знания, такие как астрофизика, квантовая или атмосферная физика и увязка постановки и применения результатов с практическими приложениями.

Оригинальная схема осуществления эксперимента “North Star” (NS) впервые позволила осуществить 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 инъекции. Полученный в эксперименте NS и проведенном ранее эксперименте “Fluxus” данные по свечению струи, возбуждению и ионизации, аномально длительному свечению окружающего газа, изменению размера светящейся области, значительно превосходящий 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. Были детально исследованы условия образования диамагнитной полости и зависимость этого процесса от параметров потока, генерация электрических полей и токов, торможение плазмы, генерация МГД возмущений перед фронтом струи, диффузия магнитного поля в плазму и образование пограничного слоя – один из плохо исследованных процессов магнитосферно-ионосферного взаимодействия. Анализ измеренных параметров электрических и магнитных полей, изменения плотности плазмы, энергии и питч-углового распределения ионов и электронов показывает достаточно согласованную картину взаимодействия ПП и магнитного поля. В то же время рассмотренные механизмы изменения этих параметров во многих случаях не подтверждены экспериментально.

Среди актуальных, но не реализованных в эксперименте задач можно отметить отсутствие или

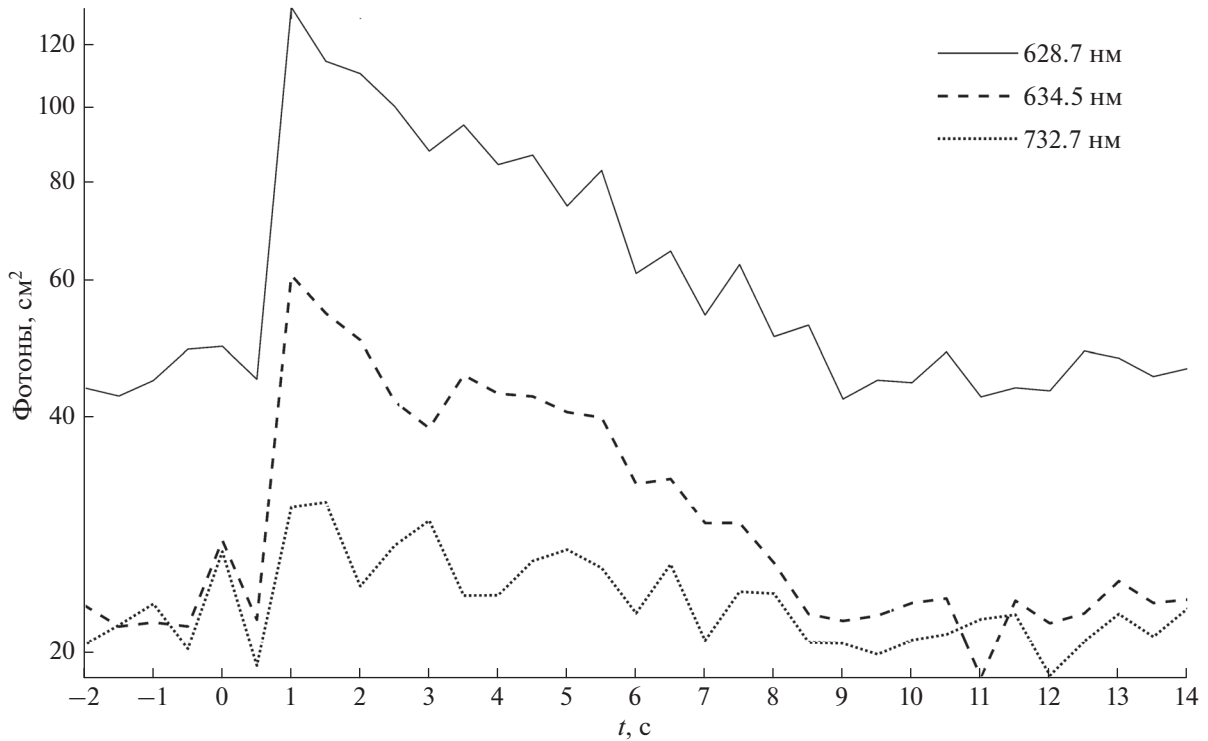


Рис. 9. Средняя яркость свечения вне зоны инжекции в эксперименте NS И-1 по данным спектрографа SPIM спутника MSX. По горизонтальной оси показано время относительно момента инжекции.

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. При И-1 эти явления могли происходить на временах, превышающих время измерений. При И-2 плазменная струя была промагничена практически с самого начала, поэтому генерация ПТ представляется очевидной. Но их величина, конфигурация и эволюция не измерены.

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.

В работе [Delzanno et al., 2020] 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.

Остается много вопросов по доминирующим механизмам взаимодействия скоростной плазмы с воздушным облаком в эксперименте NS И-1. Газодинамические оценки показывают, что после выхода ударной волны на границу воздушного облака должно происходить ускорение газа до значений, превышающих зарегистрированную скорость струи. Угол раствора воздушной струи примерно вдвое превышает угол раствора алюминиевой струи, и хотя последняя сохраняет свою форму, ее максимальная скорость уменьшается. Из данных измерений на оси струи видно, что по-

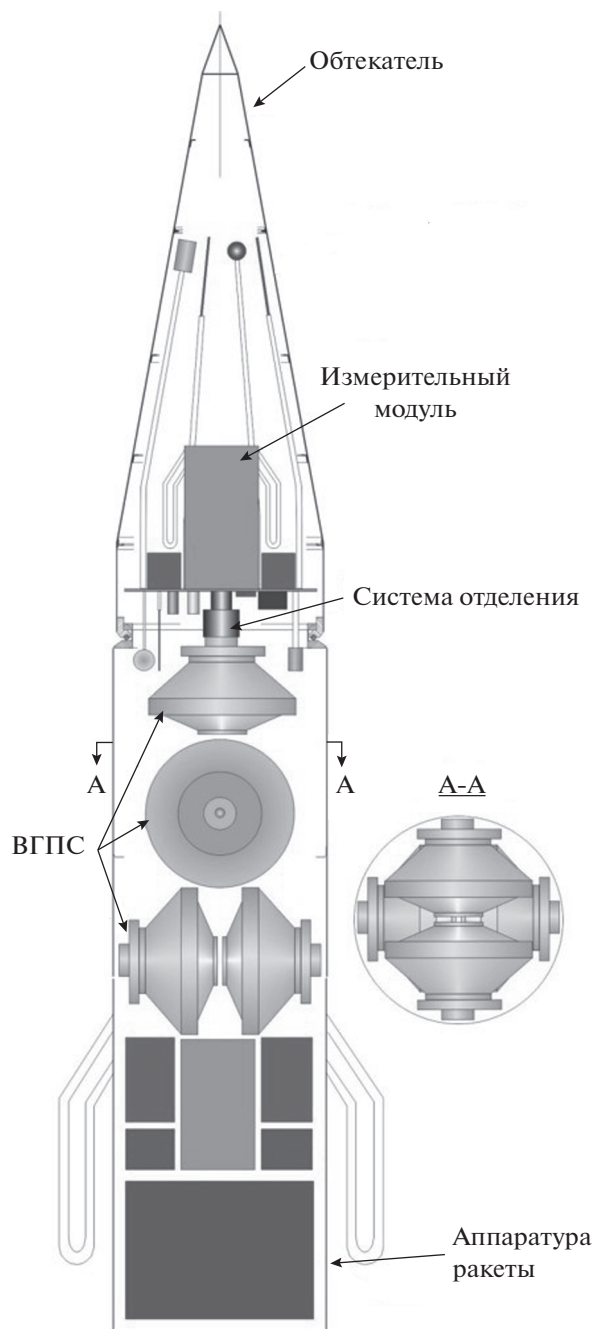


Рис. 10. Вариант компоновки головной части ракеты ансамблем взрывных плазменных генераторов ВГПС.

сле ее выхода из облака, происходит как бы выедание высокоскоростной части струи. Расширение высокоскоростной части струи в существенно более широком угле раствора при наличии воздушного облака, чем в случае инъекции в вакуум, необходимо учитывать при сравнении двух инъекций в эксперименте NS.

Успех проведенных экспериментов позволяет рассматривать развитие и/или расширение сценариев будущих исследований с учетом уже реализованных в NS возможностей. С точки зрения

совершенствования или изменения характеристик средств активного воздействия рассматривается схема использования комплекта плазменных генераторов, позволяющая увеличить энергию и массу плазменного образования 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 (рис. 10).

Надо надеяться, что прогресс в развитии ракетно-космической техники, развитие новых диагностических методов и приборов послужат стимулом и основанием для проведения новых активных экспериментов в космическом пространстве.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А17-117112350014-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В. и др.* Активные геофизические эксперименты с инъекцией высокоскоростной плазменной струи в ионосфере // Докл. РАН. 1993. Т. 331. № 4. С. 486–489.
- Адушкин В.В., Зецер Ю.И., Зотов Н.И., Киселев Ю.Н., Христофоров Б.Д., Юрьев В.Л., Поклад Ю.В.* Способ возмущения ионосферы и устройство для его осуществления. Патент на изобретение № 2144685. 2000.
- Альвен Х.* Космическая плазма. М.: Мир. 1983. 201 с.
- Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Электродинамическое торможение струи плазмы, инжектированной в магнитосферу и нагрев ионосферы // Докл. РАН. 1994. Т. 336. № 5. С. 684–687.
- 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.
- Данжи Дж.* Космическая электродинамика. М.: Атомиздат. 1961. 215 с.
- 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 // Космические исследования. 2002. Т. 40. № 3. С. 252–260.
- Райзер Ю.П.* О торможении и превращениях энергии плазмы, расширяющейся в пустом пространстве, в котором имеется магнитное поле // ПМТФ. 1963. № 6. С. 19–28.
- Angelopoulos V. et al.* Bursty bulk flows in the inner central plasma sheet // J. Geophys. Res. 1992. V. 97(A4). P. 4027–4040.
- Baumjohann W. et al.* Characteristics of high-speed ion flows in the plasma sheet // J. Geophys. Res. 1990. V. 95(A4). P. 3801–3809.
- Bernhardt P.A.* Probing the magnetosphere using chemical releases from the Combined Release and Radiation Effects Satellite // Phys. Fluids. 1992. V. B4(7). P. 2249–2256.
- Bernhardt P.A. et al.* Observation and theory of the AMPTE magnetotail barium releases // J. Geophys. Res. 1987. V. 92(A6). P. 5777–5794.
- Borovsky J.E., Bonnell J.* The dc electrical coupling of flow vortices and flow channels in the magnetosphere to the resistive ionosphere // J. Geophys. Res. 2001. V. 106(A12). P. 28967–28994.
- Brenning N. et al.* Barium swarm: An ionospheric alternating current generator in CRIT-I // J. Geophys. Res. 1991. V. 96(A6). P. 9735–9743.
- Delamere P.A. et al.* Optical observation of the early ($t < 5$ s) ion dynamics of the CRRES G1, G9 and G11A releases // J. Geophys. Res. 1996. V. 101(A8). P. 17243–17257.
- Delamere P.A. et al.* Momentum transfer in the combined release and radiation effects satellite plasma injection experiments: The role of parallel electric fields // Phys. Plasmas. 2000. V. 7(9). P. 3771–3780.
- Delamere P., Stenbaek-Nielsen H., Pfaff R., Erlandson R., Meng C., Zetzer J. et al.* Dynamics of the Active Plasma Experiment North Star Artificial Plasma Jet // J. Spacecraft and Rockets. 2004. V. 41(4). P. 503–508.
- Delzanno G.L., Borovsky J.E., Mishin E.V.* Active Experiments in Space: Past, Present and Future. Lausanne: Frontiers Media SA. 2020. Doi: <https://doi.org/10.3389/978-2-88963-659-4>
- Dimonte G., Wiley L.G.* Dynamics of exploding plasmas in a magnetic field // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67(13). P. 1755–1758.
- 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. V. 29. P. 1317–1326.
- Erlandson R.E., Swaminathan P.K., Meng C.-I. et al.* Observation of auroral emissions induced by artificial plasma jets // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26(11). P. 1553–1556.
- Fuselier S.A. et al.* Dynamics of the CRRES barium releases in the magnetosphere // J. Geophys. Res. 1994. V. 99(A9). P. 17379–17390.
- Gavrilov B.G. et al.* North Star Plasma-Jet Experiment Particles and Electric and Magnetic Field Measurements // J. Spacecr. Rockets. 2004. V. 41(4). P. 490–495.
- Gavrilov B.G., Kiselev Y.N., Podgorny I.M., Sobyanin 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 // Adv. Space Res. 1998. V. 21(5). P. 773–776.
- 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 // Geomagn. Aeron. 1994. V. 34(5). P. 6.
- Haerendel G.* Experiments With Plasmas Artificially Injected Into Near-Earth Space. Front // Astron. Space Sci. 2019. V. 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. V. 81(A13). P. 2165–2174.
- Kamide Y., Baumjohann W.* Magnetosphere-ionosphere coupling // Physics and chemistry in space. 1993. V. 23.
- Kelley M.C. et al.* Electric and magnetic field measurements inside a high-velocity neutral beam undergoing ionization // J. Geophys. Res. 1991. V. 96(A6). P. 9703–9718.
- Lynch K.A. et al.* Active Plasma Experiment: North Star Particle Data // J. Spacecraft and Rockets. 2004. V. 41(4). P. 496–502.
- Lysak R.L.* Auroral electrodynamics with current and voltage generators // J. Geophys. Res. 1985. V. 90(A5). P. 4178–4190.

Mill J.D., O'Neil R.R., Prace S. et al. Midcourse Space Experiment: Introduction to the Spacecraft. Instruments. and Scientific Objectives // *J. Spacecraft and Rockets*. 1994. V. 31(5). P. 900–907.

Petrukovich A.A. et al. Are earthward bursty bulk flows convective or field-aligned? // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106(A10). P. 21211–21215.

Pfaff R.F. et al. Electric Field. Magnetic Field. and Density Measurements on the Active Plasma Experiment Sounding Rocket // *J. Spacecraft and Rockets*. 2004. V. 41(4). P. 521–532.

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*. 2018. V. 10833: 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; 108339H.

<https://doi.org/10.1117/12.2504059>

Scholer M. On the motion of artificial ion clouds in the magnetosphere // *Planet. Space Sci.* 1970. V. 18. P. 977–1004.

Sergeev V.A. et al. Multiple-spacecraft observation of a narrow transient plasma jet in the Earth's plasma sheet // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27(6). P. 851–854.

Shiokawa K. et al. Braking of high-speed flows in the near-Earth tail // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24(10). P. 1179–1182.

Sobyanin D.B., Gavrilov B.G., Podgorny I.M. Laboratory investigation of plasma jet interaction with transverse magnetic field // *Adv. Space Res.* 2002. V. 29(9). P. 1345–1349.

Swenson C.M. et al. CRIT II electric, magnetic and density measurements in an ionizing jet // *Adv. Space Res.* 1992. V. 12(12). P. 65–90.

Valenzuela A. et al. The AMPTE artificial comet experiments // *Nature*. 1986. V. 320(6064). P. 700–703.

Physical Effects Arising From the Motion of Plasma Flows in the Ionosphere

B. G. Gavrilov^{a,*} and Yu. V. Poklad^a

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

^{*}*e-mail: boris.gavrilov34@gmail.com*

The occurrence and evolution of plasma fluxes in the ionosphere is one of the factors that have a significant impact on the dynamics and state of the geophysical environment. The study of plasma and magnetohydrodynamic effects arising from the motion of plasma jets in real space is complicated by the scale of the phenomenon and the complex nature of the background environment, which is a non-stationary system of interacting neutral and partially or completely magnetized charged particles. The creation of theoretical models of this phenomenon is also completely unsolved scientific task. Under these conditions, controlled ionospheric plasma experiments are of great importance. The results of active rocket experiments obtained over the past few decades have made it possible to study the processes of magnetohydrodynamic interaction between a high-velocity plasma and the geomagnetic field, the generation of electromagnetic and MHD waves, optical radiation in the visible, UV and IR ranges, background gas ionization, the emergence of complex systems of electric fields and currents, the acceleration of charged particles, and other phenomena. The article discusses the current physical concepts developed from the analysis of the available experimental data, as well as the tasks and possibilities of new active experiments.

Keywords: ionosphere, magnetosphere, plasma flows, geomagnetic field, field-aligned currents, active rocket geophysical experiments