

ИОНИЗАЦИЯ ВОЗДУХА ТЕПЛОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В АКТИВНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ "ФЛАКСУС"

*Т.В.Лосева, И.Б.Косарев, А.Н.Ляхов, Ю.И.Зецер, *А.В.Черменин*

Институт динамики геосфер РАН,
*Московский физико-технический институт

Предложена гипотеза ионизации воздуха тепловым излучением алюминиевой плазмы в активных геофизических ракетных экспериментах ФЛАКСУС. Представлены оценки эффекта, выполненные по 4-х компонентной плазмохимической модели ионосферы. Показана возможность повышения концентраций и температур электронов перед фронтом плазменной струи.

Введение

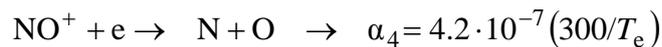
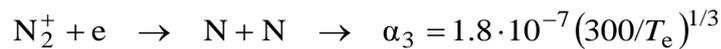
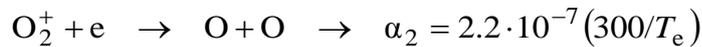
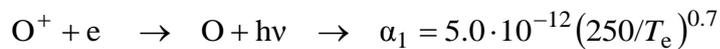
В 90-х годах ИДГ РАН провел ряд активных геофизических ракетных экспериментов (АГРЭ) с использованием взрывных плазменных генераторов [Гаврилов и др., 1998; Киселев и др., 1998; Gavrilov et al., 2004; Lynch et al., 2004; Erlandson et al., 2004]. В этих экспериментах на ионосферу Земли воздействовала струя Al плазмы с рекордными параметрами ($V \sim 40$ км/с, $E \sim 3$ МДж). Инжекция выполнялась как вдоль, так и поперек геомагнитного поля.

Анализ экспериментальных результатов показал, что динамика разлета плазмы не может быть описана только в рамках общепринятых МГД моделей [Delamere et al., 2004, Gatsonis et al., 2004]. Численное МГД моделирование процессов взаимодействия плазменной струи с геомагнитным полем дает лишь качественное согласие с данными наблюдений возмущений магнитного поля, полученными на поздней стадии эволюции плазменного образования (на больших временах после окончания инъекции). Искусственное задание начальных условий (параметров) плазмы в виде аналитически заданной сформированной симметричной конфигурации [Gatsonis et al., 2004] определяет допустимые сценарии МГД-эволюции плазмы в ионосфере. Следовательно, необходимо максимально корректное описание начальной, газодинамической, стадии инъекции плазмы. Экстремальные начальные параметры плазмы требуют учета процессов переноса излучения, что превращает задачу в радиационно-газодинамическую, в которой необходим самосогласованный расчет динамики, переноса излучения, неравновесной кинетики плазмы.

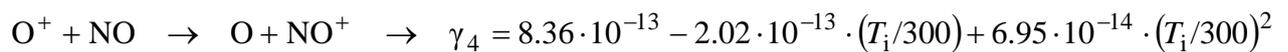
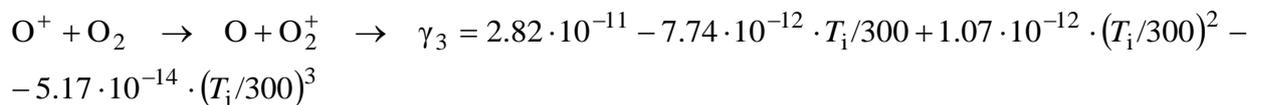
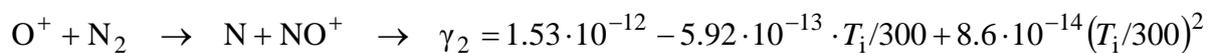
Ионизационно-рекомбинационная модель

Для оценочных расчетов возбуждения и ионизации ионосферы тепловым излучением, испущенным плазмой струи, использовалась плазмохимическая 4-х компонентная модель для ионов O^+ , O_2^+ , N_2^+ , NO^+ [Handbook of Ionospheric Models, Edited by R.W. Schunk, 1996, P. 45-46]. Параметры невозмущенной нейтральной атмосферы такие, как концентрации нейтральных частиц O , O_2 , N_2 , H , NO и температуры ионов T_i и электронов T_e рассчитывались по модели MSIS90 для времени и высоты проведения эксперимента ФЛАКСУС (15 февраля 1999 года 5:20 местного времени, 140 км). Излучение ультрафиолетового диапазона взаимодействует с нейтральными частицами ионосферы, образуя ионы O^+ , O_2^+ , N_2^+ , NO^+ . Это взаимодействие зависит от сечений поглощения и ионизации излучением соответствующих длин волн. В модели предполагалось, что при энерговыделении порядка 34 эВ образуется одна электрон-ионная пара [Banks and Kockarts, 1978; Binks, 1954]. Некоторые из этих электронов имеют достаточную энергию для вторичной ионизации. Фоновые концентрации рассматриваемых ионов задавались по модели IRI2016 [<http://iriweb.org>]. В модели рассматриваются следующие реакции (температура ионов в нашем случае меньше 1000 К):

1. Реакции рекомбинации:



2. Реакции перезарядки:



$$N_2^+ + O \rightarrow N + NO^+ \rightarrow \gamma_8 = 1.4 \cdot 10^{-10} \cdot (300/T_i)^{0.44}$$

$$N_2^+ + O_2 \rightarrow N_2 + O_2^+ \rightarrow \gamma_9 = 7.0 \cdot 10^{-11}$$

$$N_2^+ + NO \rightarrow N_2 + NO^+ \rightarrow \gamma_{10} = 3.3 \cdot 10^{-10}$$

$$N_2^+ + O \rightarrow N_2 + O^+ \rightarrow \gamma_{11} = 1.0 \cdot 10^{-12} \cdot (300/T_i)^{0.23}.$$

В рамках предлагаемой модели уравнения непрерывности для заряженных компонент записываются в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dN_{O^+}}{dt} &= q_{O^+} + \gamma_{11}N_{O_2}N_{N_2^+} - \alpha_1N_{O^+}N_e - N_{O^+}(\gamma_1N_{N_2} + \gamma_2N_{N_2} + \gamma_3N_{O_2} + \gamma_4N_{NO}) \\ \frac{dN_{O_2^+}}{dt} &= q_{O_2^+} + \gamma_3N_{O_2}N_{O^+} + \gamma_9N_{O_2}N_{N_2^+} - \alpha_2N_{O_2^+}N_e - N_{O_2^+}(\gamma_5N_{NO} + \gamma_6N_{N_2}) \\ \frac{dN_{N_2^+}}{dt} &= q_{N_2^+} + \gamma_1N_{O^+}N_{N_2} - \alpha_3N_{N_2^+}N_e - N_{N_2^+}(\gamma_7N_{O_2} + \gamma_8N_{O_2} + \gamma_9N_{O_2} + \gamma_{10}N_{NO} + \gamma_{11}N_{O}) \\ \frac{dN_{NO^+}}{dt} &= q_{NO^+} + N_{O^+}(\gamma_2N_{N_2} + \gamma_4N_{NO}) + N_{O_2^+}(\gamma_5N_{NO} + \gamma_6N_{N_2}) + \\ &+ N_{N_2^+}(\gamma_7N_{O_2} + \gamma_8N_{O_2} + \gamma_{10}N_{NO}) - \alpha_4N_{NO^+}[N_e] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{dN_e}{dt} = q - N_e(\alpha_1N_{O^+} + \alpha_2N_{O_2^+} + \alpha_3N_{N_2^+} + \alpha_4N_{NO^+}),$$

где N_K (см^{-3})- концентрация компоненты K , $q = E/W$, где E ($\text{эВ}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$) - энерговыделение за счет поглощения ионизирующего излучения, W - средняя энергия, затраченная на производство одной электрон-ионной пары ([Binks, 1954]).

В качестве основных физических процессов, ответственных за изменение температуры электронов рассматривается процесс нагрева электронов излучением и потери их энергии на упругие столкновения с положительными ионами, на упругие и неупругие столкновения с атомами и молекулами окружающего воздуха, на вращательное и колебательное возбуждение молекул кислорода и азота ([Stubbe, 1972]). В модели использованы следующие аналитические аппроксимации для всех рассматриваемых процессов потерь энергии ([Stubbe, 1972; Banks, 1966; Schunk, 1978; Кринберг, 1978]).

Диссоциативная рекомбинация:

$$Q_{eN_2^+} = N_eN_{N_2^+} \cdot 8.5 \cdot 10^{-9}$$

$$Q_{eO_2^+} = N_e N_{O_2^+} \cdot 5.5 \cdot 10^{-9}$$

$$Q_{eNO^+} = N_e N_{NO^+} \cdot 1.1 \cdot 10^{-8}$$

Упругие столкновения электронов с ионами и нейтральными частицами:

$$Q_{ei} = N_e N_i \cdot 7 \cdot 10^{-6} T_e^{-3/2} M_i^{-1} (T_e - T_i)$$

$$Q_{eO_2} = N_e N_{O_2} \cdot 1.21 \cdot 10^{-18} T_e^{1/2} (T_e - T_n) \left(1 + 3.6 \cdot 10^{-2} T_e^{1/2}\right)$$

$$Q_{eN_2} = N_e N_{N_2} \cdot 1.77 \cdot 10^{-19} T_e (T_e - T_n) \left(1 - 1.21 \cdot 10^{-4} T_e\right)$$

$$Q_{eO} = N_e N_O \cdot 5.3 \cdot 10^{-19} T_e^{1/2} (T_e - T_n) \left(1 + 5.7 \cdot 10^{-4} T_e\right)$$

$$Q_{eHe} = N_e N_{He} \cdot 2.46 \cdot 10^{-17} T_e^{1/2} (T_e - T_n)$$

$$Q_{eH} = N_e N_H \cdot 9.63 \cdot 10^{-16} \left(1 - 1.35 \cdot 10^{-4} T_e\right) T_e^{1/2} (T_e - T_n)$$

Вращательное возбуждение молекул кислорода и азота:

$$Q_{rO_2} = N_e N_{O_2} \cdot 7.0 \cdot 10^{-14} T_e^{-1/2} (T_e - T_n)$$

$$Q_{rN_2} = N_e N_{N_2} \cdot 2.8 \cdot 10^{-14} T_e^{-1/2} (T_e - T_n)$$

Колесательное возбуждение молекул кислорода и азота:

$$Q_{vO_2} = N_e N_{O_2} \cdot 7.45 \cdot 10^{-13} \exp\left(f_1 \frac{T_e - 700}{700 T_e}\right) \left[1 - \exp\left(-3000 \frac{T_e - T_n}{T_e T_n}\right)\right], \text{ где}$$

$$f_1 = 3.902 \cdot 10^3 + 4.38 \cdot 10^2 \tanh\left[4.56 \cdot 10^{-4} (T_e - 2400)\right]$$

$$Q_{vN_2} = N_e N_{N_2} \cdot 2.99 \cdot 10^{-12} \exp\left(f_2 \frac{T_e - 2000}{2000 T_e}\right) \left[1 - \exp\left(-g \frac{T_e - T_n}{T_e T_n}\right)\right], \text{ где}$$

$$f_2 = 1.06 \cdot 10^4 + 7.51 \cdot 10^3 \tanh\left[1.10 \cdot 10^{-3} (T_e - 1800)\right]$$

$$g = 3300 + 1.233(T_e - 1000) - 2.056 \cdot 10^{-4} (T_e - 1000)(T_e - 4000)$$

Возбуждение уровня 1D атома O:

$$Q_{seO} = N_e N_O \cdot 1.57 \cdot 10^{-12} \exp\left(f_3 \frac{T_e - 3000}{3000 T_e}\right) \left[1 - \exp\left(-22713 \frac{T_e - T_n}{T_e T_n}\right)\right]$$

$$f = 2.4 \cdot 10^4 + 3.0 \cdot 10^{-1} (T_e - 1500) - 1.947 \cdot 10^{-5} (T_e - 1500)(T_e - 4000)$$

Возбуждение тонкой структуры атома O:

$$Q_{fO} = N_e N_O \cdot 3.4 \cdot 10^{-12} T_n^{-1} \left(1 - 7 \cdot 10^{-5} T_e\right) (T_e - T_n).$$

$$Q = Q_{ei} + Q_{eN_2^+} + Q_{eO_2^+} + Q_{eNO^+} + Q_{eO_2} + Q_{eN_2} + Q_{eO} + Q_{eHe} + Q_{eH} + Q_{eO_2} + Q_{rN_2} + Q_{rO} + Q_{vN_2} + Q_{seO} + Q_{fO},$$

где Q (эВ·см⁻³·с) - полные потери энергии электронов.

Температура электронов в приближении идеального электронного газа ([Кринберг, 1978]) описывается уравнением:

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{2}{3k_B N_e} (\varepsilon_T E - Q), \quad (2)$$

где k_B - постоянная Больцмана, ε_T - энергия, переходящая в среднем к тепловым электронам от одного вновь образовавшегося фотоэлектрона. Использовалась экспериментальная зависимость ε_T от степени ионизации $\alpha = N_e / (N_{O_2} + N_{N_2} + 0.1 \cdot N_O)$ ([Swartz, 1972]), которая была аппроксимирована выражением: $\varepsilon_T = \exp(0.219 \cdot \ln \alpha + 2.646)$.

Решение системы уравнений (1)-(2) позволяет получить зависимость от времени концентраций и температур электронов в различных точках пространства.

Результаты расчетов

Описанная выше плазмохимическая модель была использована для оценки ионизации и возбуждения ионосферы под действием излучения алюминиевой струи, инжектируемой в воздух на высоте экспериментов ФЛАКСУС (высота 140 км, плотность окружающей среды $3 \cdot 10^{-12}$ г/см³). Зависимость энерговыделения $E(t)$ рассчитывалась с помощью численного моделирования начальной стадии динамики плазменной струи в рамках радиационно-газодинамической модели, описанной в работах [Лосева и др., 2016; Лосева и др., 2017; Лосева и др., 2018]. В этой модели предполагалось, что пары алюминия находятся в состоянии локального термодинамического равновесия. При проведении расчетов были использованы таблицы термодинамических и оптических свойств паров алюминия [Косарев, 2017] и воздуха [Авилова и др., 1970]. Для решения системы уравнений, записанной в лагранжевых координатах (секторное приближение), использовалась неявная абсолютно устойчивая полностью консервативная схема для решения газодинамических уравнений, описывающих движение паров алюминия, и диффузионное приближение для самосогласованного расчета переноса излучения. Граничное условие на границе расширяющейся области соответствовало давлению

окружающего воздуха на рассматриваемой высоте. Характеристики свечения возмущенной области рассчитывались независимым интегрированием уравнений переноса излучения вдоль совокупности большого количества лучей, проходящих в точку наблюдения через расчетную область.

В расчетах радиационно-газодинамических процессов в алюминиевой плазме рассматривались следующие группы по длинам волн (энергиям фотонов): инфракрасное излучение $41 \div 1.13$ мкм ($0.03 \div 1.1$ эВ), $i = 1$; видимый свет $1.13 \div 0.41$ мкм ($1.1 \div 3.1$ эВ), $i = 2$; ультрафиолетовый диапазон $0.4 \div 0.26$ мкм ($3.1 \div 6$ эВ), $i = 3$; $0.26 \div 0.14$ мкм ($6 \div 9$ эВ), $i = 4$; $0.14 \div 0.06$ мкм ($9 \div 20$ эВ), $i = 5$ и рентгеновское излучение $0.06 \div 0.016$ мкм ($20 \div 81$ эВ), $i = 6$.

Рассмотрим результаты расчетов для сценария инъекции алюминиевой струи, параметры которого приведены на рисунке 1. В этом эксперименте инъекция выполнялась поперек геомагнитного поля. На рис. 2 приведены зависимости от времени интенсивности ионизирующего излучения (i - номер группы фотонов) ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов, испущенного горячей плазмой алюминия в направлении движения струи.

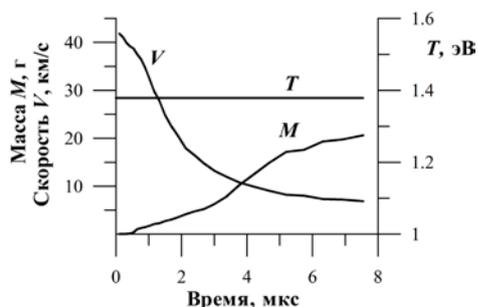


Рис. 1 Зависимости от времени массы, скорости и температуры алюминиевой плазмы на срезе сопла.

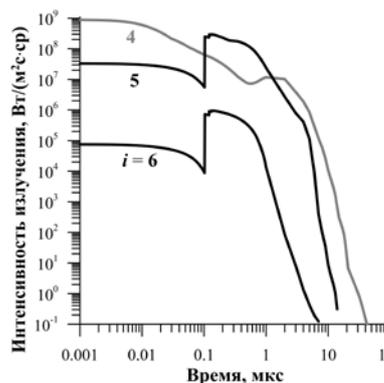


Рис.2 Зависимость от времени интенсивностей излучения групп фотонов УФ и рентгеновского диапазонов.

Функция $q(t)$ существенно меняется при изменении расстояния от края алюминиевой плазмы до точки наблюдения. На рис. 3 приведены зависимости $q(t)$ на расстояниях R от среза сопла. Кривые обрываются в момент достижения плазмой струи расстояния R .

Результаты решения системы уравнений (1) - (2) с включением источника ионизирующего ультрафиолетового излучения, испущенного плазменной струей, приведены на рисунках 4 и 5. На рис. 4 показано изменение температуры и

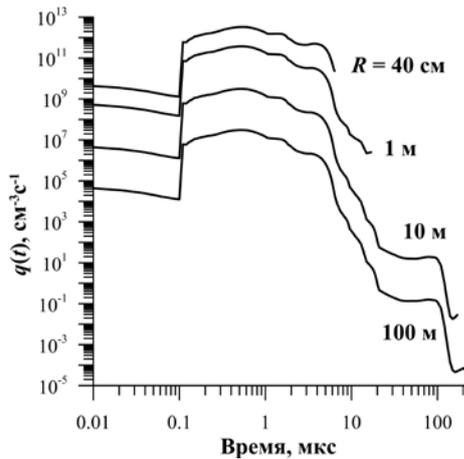


Рис. 3 Зависимости $q(t)$ на расстояниях R от среза сопла.

концентрации электронов в двух точках перед струей: на расстоянии 1 м от среза сопла (сплошные кривые) и на расстоянии 10 м (пунктир). Так выглядели бы приведенные параметры на больших временах, то есть на временах выхода на фоновые значения, соответствующие рассматриваемой высоте 140 км и времени проведения эксперимента ФЛАКСУС. Кружками отмечены моменты прекращения импульса излучения вследствие достижения приведенных значений R фронтом струи. Фоновое значение концентрации нейтралов $\sim 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, на этих расстояниях степень ионизации $\alpha \sim 10^{-7} - 10^{-4}$. Согласно [Schwarz, 1972], в этом диапазоне α рассматриваемая ионизационно-рекомбинационная модель применима. Результаты расчетов динамики основных радиационно-газодинамических параметров алюминиевой струи и параметров ионизованного воздуха перед фронтом струи

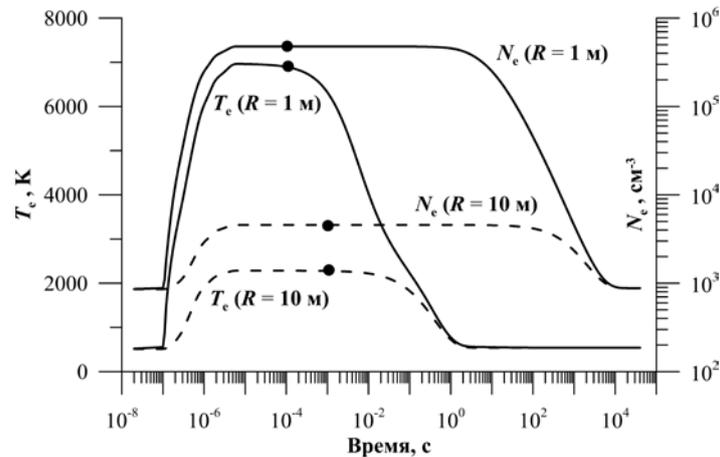


Рис. 4 Зависимость от времени температуры и концентрации электронов в двух точках перед струей: на расстоянии 1 м от среза сопла (сплошные кривые) и 10 м (пунктир). Кружки соответствуют времени окончания импульса излучения.

приведены на рисунке 5. Расчеты N_e и T_e показали, что тепловое излучение струи может вызывать повышение электронной температуры в 20 раз, и рост концентрации электронов на 4 порядка, что соответствует степени ионизации фоновой среды $\sim 10^{-4}$. Размер области ионизации оценивается в ~ 100 м от среза сопла.

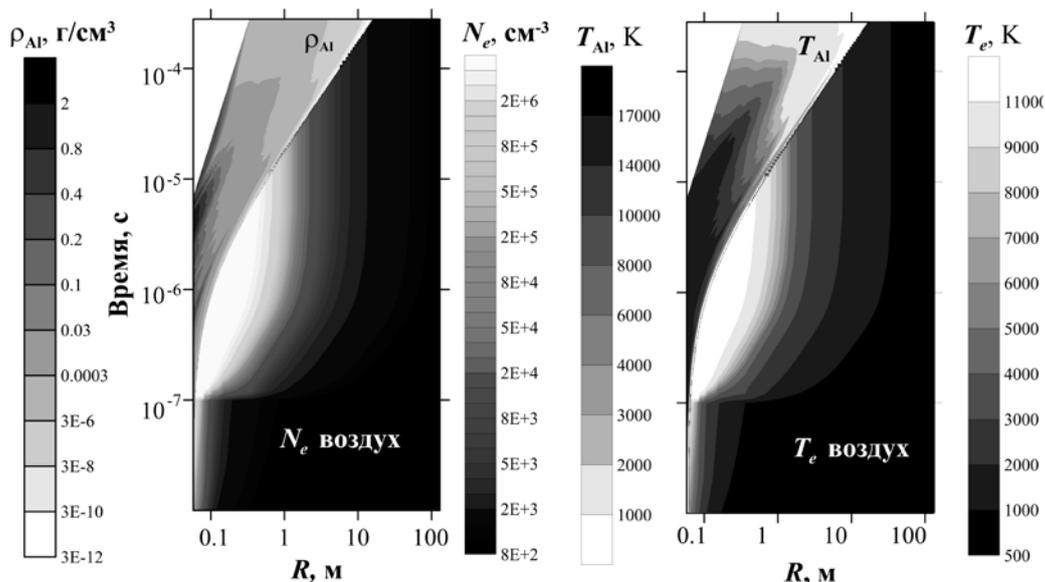


Рис. 5 Пространственно – временные распределения плотности алюминиевой плазмы ρ_{Al} в струе, ее температуры T_{Al} , концентрации N_e и температуры T_e электронов в окружающем воздухе, ионизованном излучением, испущенным горячей алюминиевой плазмой. Здесь R - расстояние от среза сопла.

Выводы

В рамках радиационной газодинамики Al-плазмы и ионизационно-рекомбинационной модели ионосферы показано, что тепловое излучение из потока плазмы на начальной стадии может создавать в окружающей среде ионизационный предвестник. Дальнейшая верификация выдвинутой гипотезы и оценка важности этого процесса будет проводится сравнением с данными спектральных измерений в эксперименте North Star.

Литература

Авилова И.В., Биберман Л.М., Воробьев В.С., Замалин В.М., Кобзев Г.А., Лагарьков А.И., Мнацаканян А.Х., Норман Г.Э. Оптические свойства горячего воздуха: Справочник / под ред. Л.М. Бибермана. М: Наука, 1970. 320 с.

Адушкин В.В., Зецер Ю.И., Киселев Ю.Н., Немчинов И.В., Христ офоров Б.Д. Активные геофизические ракетные эксперименты с инъекцией плазменной струи в ионосфере // ДАН АН СССР. 1993. Т. 31. № . С. 486-489.

Адушкин В.В., Зецер Ю.И., Гаврилов Б.Г., Грыцькив И.В., Киселев Ю.Н., Романовский Ю.А., Рыбаков В.А., Менг Ч.-И., Эрландсон Р., Стоянов Б. Активные эксперименты "Флаккус 1,2": исследование взаимодействия плазменной струи с геофизической средой на высоте 140 км // ДАН РФ. 1998. Т. 361. № 6. С. 818-821.

Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Подгорный А.И., Подгорный И.М., Собянин Д.Б. Взаимодействие потоков плазмы с геомагнитным полем в экспериментах "Флаккус" //Динамические процессы в геосферах под действием внешних и внутренних потоков энергии и вещества (геофизика сильных возмущений). Сб. научн. тр. М.: ИДГ РАН, 1998. С. 168-180.

Киселев Ю.Н., Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Поклад Ю.В., Рыбаков В.А. Радиационные характеристики и динамика области взаимодействия высокоскоростной струи с ионосферой в геофизических ракетных экспериментах "FLUXUS" // Динамические процессы в геосферах под действием внешних и внутренних потоков энергии и вещества (геофизика сильных возмущений). Сб. научн. тр. М.: ИДГ РАН, 1998. С. 181-190.

Киселев Ю.Н., Зецер Ю.И., Поклад Ю.В., Рыбаков В.А. Возникновение сильно ионизированного предвестника перед движущейся в разреженном воздухе высокоскоростной плазменной струей // Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках Земли (геофизика сильных возмущений). Сб. научн. тр. М.: ИДГ РАН, 2002б. С. 323-331.

Косарев И.Б. Радиационные свойства алюминиевой плазмы // Сб. научн. тр. М.: ИДГ РАН, 20017. Вып.9. С. 102-110.

Кринберг И.А. Кинетика электронов в ионосфере и плазмосфере Земли. М., Наука. 1978. С.215.

Лосева Т.В., Голубь А.П., Косарев И.Б., Ляхов А.Н., Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Черменин А.В. Начальная стадия развития плазменной струи в активных геофизических ракетных экспериментах // Сб. научн. тр. М.: ИДГ РАН, 20017. Вып.9. С. 102-110.

Лосева Т.В., Голубь А.П., Косарев И.Б., Зецер Ю.И., Ляхов А.Н., Черменин А.В. Свечение высокотемпературного алюминиевого облака на начальной стадии его разлета в ионосфере // Сб. научн. тр. М.: ИДГ РАН, 20018. Вып.10. С. 193-200.

Лосева Т.В., А.П. Голубь, А.Н. Ляхов, И.Б. Косарев. Радиационный эффект Челябинского болида //Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. Вып. 11-12. С.773-779.

Banks P.M., Kockarts G. Aeronomy. 1973. Academic Press. P. 430.

Binks W. Energy by ion pair /Acta Radiologica. 1954. 41:sup117. P. 85-104.

Delamere P.A, Stenbaek-Nielsen H.C., R.F. Pfaff R.F., Erlandson R.E., Meng C.I., J.I. Zetzer J.I., Kiselev Y.N, Gavrilov B.G. Dynamics of the Active Plasma Experiment North Star Artificial Plasma Jet // Journal of Spacecraft and Rockets. 2004. V. 41 No. 4. P. 503-508.

Erlandson R. E., Meng C. I., Swaminathan P. K., Kumar C. K., Dogra V. K., Stoyanov B. J.,
*Gavrilov B. G., Kiselev Y.N., Zetzer J. I., Stenbaek-Nielsen H. C., Lynch K. A., Pfaff
R.F., Delamere P. A., Bounds S., Gatsonis N. A.* North Star Plasma-Jet Space Experiment //
Journal of Spacecraft and Rockets. 2004. V. 41. No. 4. P. 483-489.

Gatsonis N.A., DeMagistris M., Erlandson R.E. Three-Dimensional
Magnetohydrodynamic Modeling of Plasma Jets in North Star Space Experiment// Journal of
Spacecraft and Rockets. 2004. V. 41. No. 4. P. 509-520.

*Lynch K.A., Torbert R. B., Chutter M., Erlandson R. E., Meng C. I., Zetzer J. I.,
Gavrilov B. G., Kiselev Y.N.* Active Plasma Experiment: North Star Particle Data // Journal of
Spacecraft and Rockets. 2004. V. 41. No. 4. P. 496-502.

Schunk R.W., Nagy A.F. Electron Temperatures in the *F* Region of the Ionosphere:
Theory and Observations // Journal of Reviews of Geophysics and Space Physics. 1978. V.16
No.3. P. 355-399.

Stubbe P., Varnum W.S. Electron energy transfer rates in the ionosphere // Journal of
Planet. Space Sci. 1972. V.20. P 1121-1126.

Swartz W.E., Nisber J.S. Revised Calculations of *F* Region Ambient Electron Heating
by Photoelectrons // Journal of Geophysical Research. 1972. V. 77, No. 31. P. 6259-6261.

Solar-Terrestrial Energy Program: Handbook of Ionospheric Models. 1996. Ed.
R.W.Schunk. 295 p.