

ДИНАМИКА РАЗЛЕТА ИСКУССТВЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2024 г. Т.В. Лосева^{a,b,*}, Е.М. Урвачев^{a,b,c}, Е.С. Гончаров^{a,b}, А.Н. Ляхов^{a,b}

^aИнститут динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

^bФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова”, Москва, Россия

^cНИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*e-mail: Tatiana.Losseva@gmail.com

Поступила в редакцию 30.07.2024 г.

После доработки 28.09.2024 г.

Принята к публикации 01.10.2024 г.

Приводятся результаты численного моделирования начальной стадии разлета плазменных образований, образованных при инъекции высокоскоростных алюминиевых плазменных струй в ионосферу Земли на различных высотах, соответствующих двум экспериментам “Северная звезда”. Исследовано влияние искусственной атмосферы, представленной воздушным облаком, на параметры плазменного образования в эксперименте “Северная звезда-I”. Определены газодинамические параметры плазменных образований и их оптические характеристики. Представлено сравнение результатов расчетов с результатами измерений по кривым светимости в двух диапазонах длин волн фотометров, которое показало хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: активные ракетные эксперименты в ионосфере, высокоскоростная алюминиевая плазменная струя, взрывные плазменные генераторы, численное моделирование, оптические характеристики плазменного образования

DOI: 10.31857/S0367292124110081, EDN: FBRHFM

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных геофизических проблем в настоящее время является разработка физических и прогностических моделей процессов, определяющих динамику потоков плазмы на разных высотах в ионосфере Земли. Для верификации теоретических моделей динамики разлета свободной плазмы, которую невозможно осуществить в условиях лабораторного эксперимента, целесообразно использовать результаты проведенных ранее активных геофизических ракетных экспериментов (АГРЭ) с инъекцией высокоскоростных плазменных струй в ионосферу Земли.

В АГРЭ, проведенных ИДГ РАН в 90-х гг. прошлого столетия, высокоскоростные плазменные потоки создавались взрывными генераторами плазменных струй ВГПС. В этих экспериментах на ионосферу Земли воздействовала струя алюминиевой плазмы с рекордными параметрами ($V \sim 40$ км/с, $\dot{A}$ до 6 МДж). Целью экспериментов являлось исследование процессов взаимодействия плазменных потоков с окружающей средой и геомагнитным полем, процессов генерации ионосферных возмущений разных пространственных и временных масштабов, а также определение физических механизмов и характеристик этих процессов. Инъекция выполнялась как вдоль, так и поперек геомагнитного поля. Была выполнена серия

экспериментов: “Кумулус” на высоте 150 км [1, 2], “Флаккус” на высоте 140 км [3–5], два эксперимента “Северная звезда-I” на высоте 360 км и “Северная звезда-II” на высоте 270 км [6–10]. Детальное описание экспериментов и результаты первичных измерений приведены в работе [11]. Ранее проводились аналогичные американские эксперименты CRIT-II по инъекции бария/цезия [12, 13], но с гораздо меньшей скоростью и энергией.

Задача физической интерпретации данных наблюдений требует определения параметров плазмы на начальной газодинамической стадии расширения. Физические модели должны учитывать процессы переноса излучения, так как тепловое излучение, испускаемое высокотемпературной плазмой струи и распространяющееся на большие расстояния, может быть одной из основных причин ионизации, возбуждения и генерации интенсивного свечения воздуха. Верификация теоретических моделей осуществляется сравнением результатов расчетов оптических параметров с существующими данными измерений на датчиках, расположенных на оптических модулях [11].

В свою очередь, для численного моделирования динамики плазменной струи необходимо знать сценарий инъекции плазмы, т. е. динамику газодинамических параметров плазмы при выходе струи из выходного отверстия генератора. Так как прямое числен-

ное моделирование процессов, происходящих внутри генератора, является весьма трудоемкой задачей, и вследствие отсутствия полной диагностики этого процесса в ионосфере, в работах [14, 15] была сформулирована и решена обратная задача определения сценариев инжекции для двух генераторов: ВГПС-300 (эксперимент “Флаккус”) и ВГПС-400 (эксперименты “Северная звезда”). При этом использовались все имеющиеся данные измерений газодинамических параметров на определенных расстояниях от сопла генератора в наземных экспериментах. Результаты численного моделирования начальной стадии инжекции плазмы, проведенного в рамках разработанной радиационно-газодинамической модели, (с учетом разработанного сценария инжекции) показали хорошее согласие с данными измерений в наземных экспериментах.

Для эксперимента “Флаккус” в [14] приведено сравнение зависимостей от времени расчетных плотностей потоков излучения (кривых светимости, характеризующих тепловое излучение плазмы) с данными измерений фотодиодами, расположенными на бортовом модуле, которые проводились синхронно с инжекцией с расстояния 130 м от генератора в первые 100 мкс разлета. Сравнение показало хорошее согласие расчетных и экспериментальных кривых светимости.

В эксперименте “Северная звезда-I”, в отличие от других АГРЭ, за ~200 мс до начала инжекции алюминиевой плазмы перед генератором плазменной струи в ионосферу был выпущен сухой воздух. Такая постановка эксперимента была выполнена для исследования влияния среды с переменной плотностью на параметры разлетающейся плазмы [11]. Заметим, что конструкция ВГПС обеспечивает разделение во времени инжекции плазмы и дальнейший разлет продуктов взрыва генератора.

Цель настоящей работы: исследование влияния на динамику алюминиевой плазмы искусственной атмосферы, созданной воздушным облаком, в эксперименте “Северная звезда-I” и разлета продуктов взрыва как в эксперименте “Северная звезда-I”, так и в эксперименте “Северная звезда-II”, а также верификация используемой при этом модели с помощью сравнения результатов расчетов с имеющимися данными оптических наблюдений.

Статья построена следующим образом. В разд. 2 приводится описание используемой модели и постановка задачи расчета газодинамических параметров плазменного облака, в разд. 3 приводятся результаты расчетов газодинамических параметров плазмы, раздел 4 посвящен методу получения оптических характеристик плазменного образования и их сравнению с имеющимися данными наблюдений, в Заключение обсуждаются основные результаты.

2. МОДЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОГО ОБЛАКА

Динамика начальной стадии разлета искусственных плазменных образований в экспериментах “Северная звезда-I” и “Северная звезда-II” исследовалась с помощью численного моделирования в гидродинамическом приближении. На рассматриваемых ионосферных высотах плотность окружающего воздуха мала, и длина свободного пробега частиц может оказаться больше размеров самого плазменного образования. Такие параметры среды находятся на границе применимости гидродинамического подхода. С другой стороны, пробег частиц в области горячей плотной плазмы струи значительно меньше, поэтому невозможно напрямую использовать методы, развитые для бесстолкновительной плазмы [16–19]. В работе [20], в которой представлены результаты разработки модифицированного метода моделирования инжекции плазмы в разреженную среду, соответствующую параметрам верхней ионосферы, было показано, что возникающая в стандартном гидродинамическом подходе численная ударная волна практически не влияет на оптические параметры плазмы. Кроме того, при ограничении расчетов рассмотрением начальной стадии разлета, когда давление инжектируемой плазмы на много порядков превышает магнитное давление в среде, применение гидродинамического подхода представляется обоснованным.

Предполагается, что плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия, что оправдано для плотной высокотемпературной плазмы. Приведем используемую систему уравнений эйлеровой гидродинамики в дивергентном виде

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

где векторы

$$\mathbf{U} = \left[\rho, \rho v_j, \rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right]^T$$

и

$$\mathbf{F}_i = \left[\rho v_i, \rho v_i v_j + p \delta_{ij}, \left(\rho e + \frac{\rho v^2}{2} + p \right) v_i \right]^T,$$

а ρ , v , p и e — плотность, скорость, давление и удельная внутренняя энергия вещества соответственно, t — время, δ_{ij} — дельта-символ Кронекера, T означает транспонирование. Для замыкания системы уравнений (1) используются табличные уравнения состояния $p = p(\rho, T)$ и $e = e(\rho, T)$.

Процесс формирования плазменных образований в рассматриваемых численных экспериментах включает в себя

1) выпуск 12 г сухого воздуха из выходного отверстия сопла генератора ВГПС-400 с радиусом 0.5 см в ионосферу с $\rho_0 = 10^{-14}$ г/см³, $T_0 = 1400$ К (высота

360 км) при численном моделировании эксперимента “Северная звезда-I”;

2) через 200 мс инъекцию алюминиевой струи в воздух с полученными параметрами (по сценарию, приведенному в [15, 21]) для эксперимента “Северная звезда-I” или в ионосферу с $\rho_0 = 5 \cdot 10^{-14}$ г/см³, $T_0 = 1340$ К (высота — 260 км) для эксперимента “Северная звезда-II” (радиус выходного отверстия сопла генератора при инъекции — 1 см);

3) после окончания инъекции (~25 мкс) начало разлета продуктов взрыва из начального объема — диска, обладающего размерами ВГПС-400 (радиус — 40 см, высота — 20 см).

Граничные условия: левая грань (до окончания инъекции) — стенка диска с радиусом ~40 см и высотой ~20 см, остальные грани (во все моменты времени) — свободные границы.

Численное моделирование производилось с помощью многомерного параллельного радиационно-газодинамического кода FRONT [22, 23]. Для расчета использовалась неравномерная двумерная цилиндрическая сетка (RZ-геометрия) со сгущением в области инъекции. В едином сквозном расчете сначала моделировался выпуск сухого воздуха (для эксперимента “Северная звезда-I”), затем инъекция алюминиевой плазмы согласно сценарию инъекции для ВГПС-400 (рис. 1б) и последующий разлет продуктов взрыва из начального объема — диска, обладающего размерами, соответствующими размерам генератора ВГПС-400 (радиус — 40 см, высота — 20 см). Для расчета использовалась гуденовская схема, основанная на приближенном римановском решателе HLLC [24]. Для корректного описания формы облака сухого воздуха и струи до момента окончания инъекции в вычислительной области занулялись потоки через границы ячеек, соответствующих генератору. Далее кор-

рекция потоков отключалась и начинался свободный разлет плазмы с составом, близким к продуктам взрыва (28.5% — N, 26.5% — C, 2.5% — O, 42.5% — H, указаны проценты по массовой доле). Уравнения состояния также согласованно рассчитывались кодом FRONT.

Как показали предыдущие радиационно-газодинамические расчеты динамики струи при одиночной инъекции [15], вклад излучения в общую динамику движения плазмы при рассматриваемых параметрах крайне мал, поэтому для упрощения расчетов численное моделирование газодинамической стадии разлета плазмы выполнялось без учета переноса теплового излучения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ “СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА-I” И “СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА-II”

Рисунок 1а, на котором приведено пространственное распределение плотности выпущенного воздуха в момент времени $t = 200$ мс, демонстрирует форму образовавшегося облака, в которое в эксперименте “Северная звезда-I” начиналась инъекция высокоскоростной струи алюминиевой плазмы. За это время облако воздуха расширилось более, чем на 200 м. При этом плотность воздуха вблизи выходного отверстия сопла генератора соответствует плотности атмосферы на высоте 140–150 км, как и предполагалось при планировании эксперимента.

Зависимости от времени t газодинамических параметров плазмы при ее вылете из выходного отверстия сопла генератора ВГПС-400, используемого в обо-

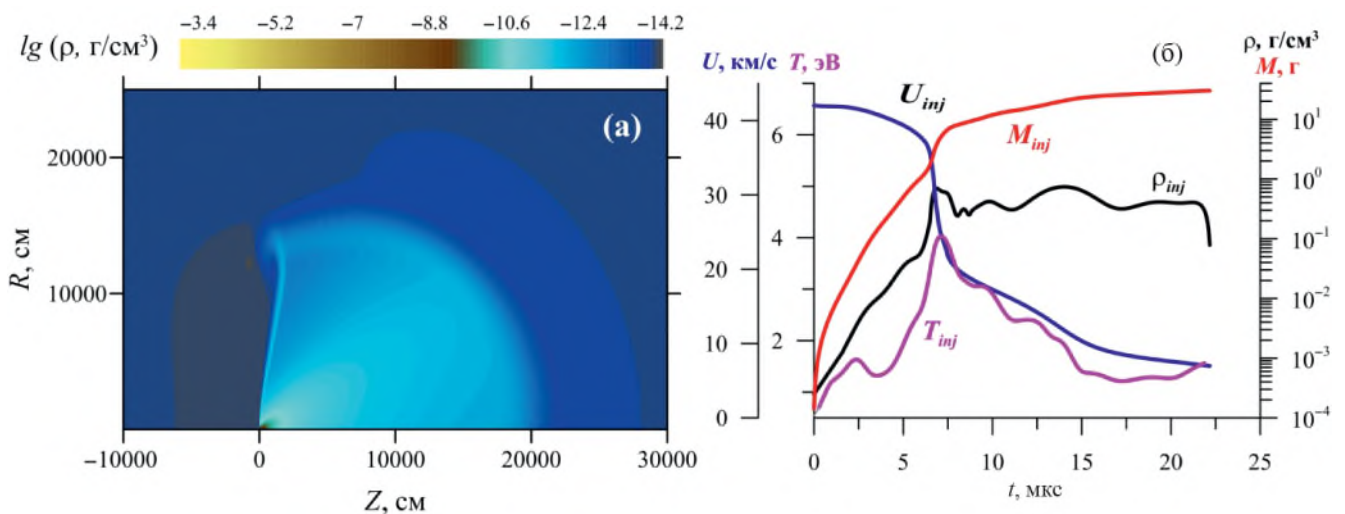


Рис. 1. Пространственное распределение плотности выпущенного воздуха в момент времени $t = 200$ мс (а), зависимости от времени t газодинамических параметров струи при ее вылете из сопла генератора ВГПС-400 (б). Здесь M_{inj} — инжестируемая масса алюминиевых паров, U_{inj} — их скорость, ρ_{inj} — плотность, T_{inj} — температура.

их экспериментах “Северная звезда”, приведены на рис. 1б. Здесь M_{inj} — инжектируемая масса алюминиевых паров, U_{inj} — их скорость, ρ_{inj} — плотность, T_{inj} — температура. Этот полученный в расчетах [15] сценарий инжекции, показал хорошее согласие данных расчетов с имеющимися данными измерений в наземных экспериментах.

На рис. 2 приведены пространственные распределения плотности для двух моментов времени, соответствующих процессу инжекции в экспериментах “Северная звезда-I” (а, в) и “Северная звезда-II” (б, г). Красные кривые на этих рисунках отделяют область чистого алюминия, вне которой — воздух. Наличие воздушного облака приводит к заметному (в ~ 1.5 раза) ограничению процесса расширения плазменной струи как в боковом, так и во фронтальном направлениях.

В обоих экспериментах после окончания инжекции выходное отверстие сопла генератора перекрывалось, и через некоторое время после этого начинался разлет продуктов взрыва и вещества генератора. Так как время задержки не определено, для простоты при численном моделировании этот разлет начинался в момент времени 25 мкс, а вещество продуктов представляло собой смесь, описанную в предыдущем разделе. На рис. 3 и 4 представлены пространственные распределения плотности ρ и температуры T в момент времени 100 мкс и 3 мс соответственно. Здесь, рисунки (а, в) соответствуют эксперименту “Северная звезда-I”, а (б, г) — “Северная

звезда-II”. Белые кривые — границы продуктов взрыва, красные — алюминиевых паров. Если максимальная температура алюминиевой плазмы в момент времени 100 мкс в эксперименте “Северная звезда-I” превышает аналогичную температуру в эксперименте “Северная звезда-II” (~ 19000 К по сравнению с ~ 14000 К), то в момент времени 3 мс эти температуры выравниваются. Величина скорости фронта $V_z \sim 40$ км/с практически не изменяется.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ. СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ “СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА-I” И “СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА-II”

Схема расположения научных модулей с измерительной аппаратурой относительно плазменных генераторов в экспериментах “Северная звезда” приведена в работе [11]. Специализированная высокоскоростная оптическая аппаратура размещалась на модулях OSP (Optical Space Payload) на расстоянии 1020 м в эксперименте “Северная звезда-I” и на расстоянии 1595 м в эксперименте “Северная звезда-II”. Оба модуля были стабилизированы в пространстве таким образом, что их объективы были направлены на инжектируемую струю навстречу ее движению и имели угол зрения 18° .

Характеристики теплового излучения плазменного

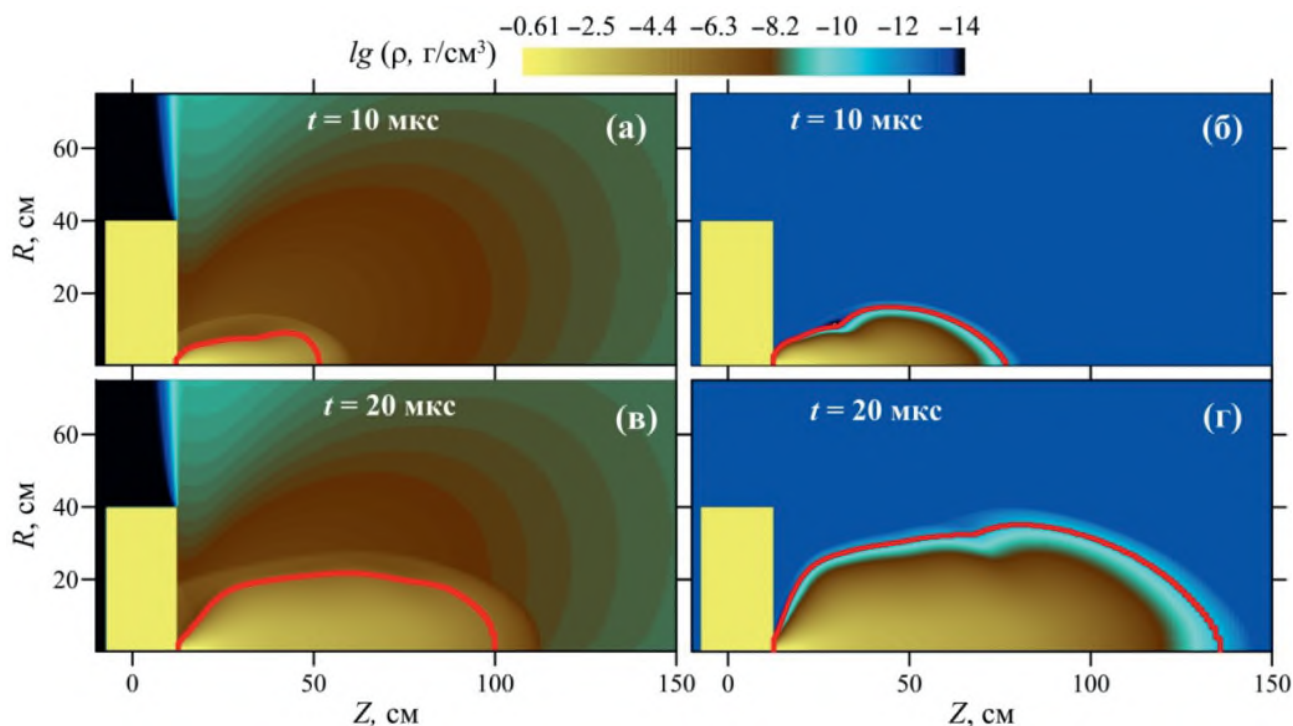


Рис. 2. Пространственные распределения плотности для двух моментов времени, соответствующих процессу инжекции в экспериментах “Северная звезда-I” (а, в) и “Северная звезда-II” (б, г). Красные кривые на этих рисунках отделяют область чистого алюминия, вне которой — воздух.

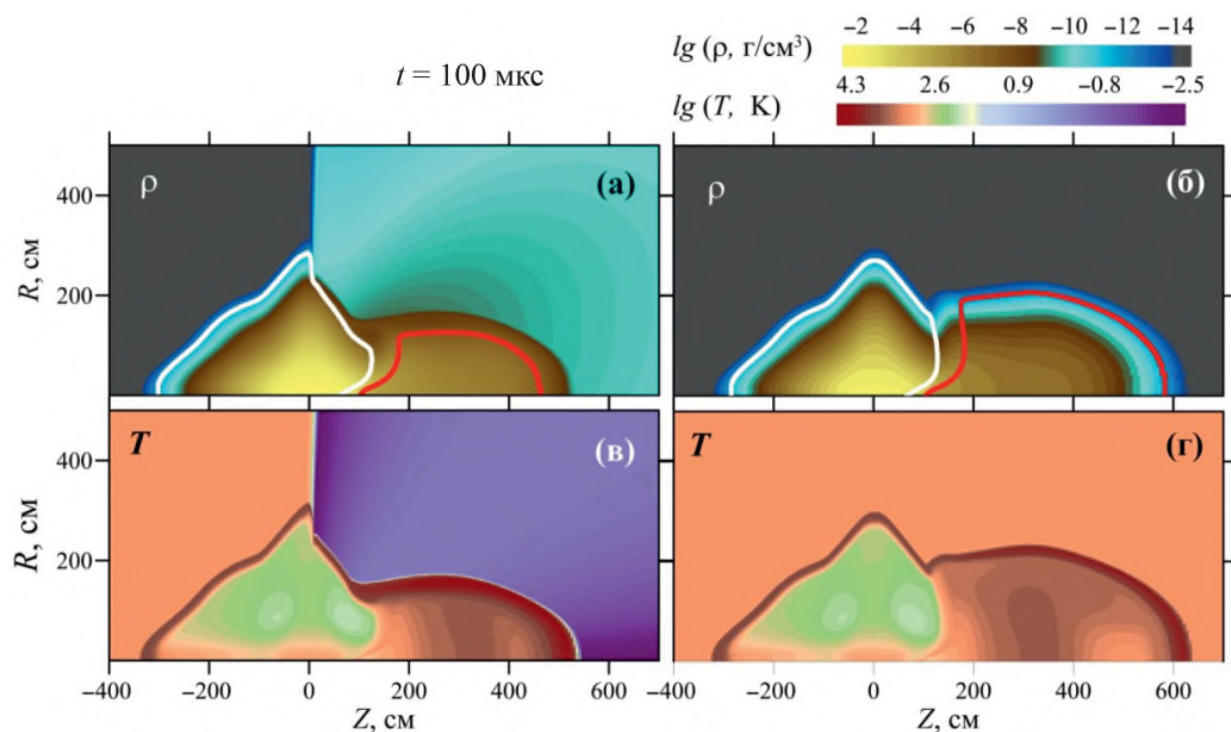


Рис. 3. Пространственные распределения плотности ρ и температуры T в момент времени 100 мкс: (а, в) соответствуют эксперименту “Северная звезда-I”, (б, г) — “Северная звезда-II”. Белые кривые — граница продуктов взрыва, красные — алюминиевых паров.

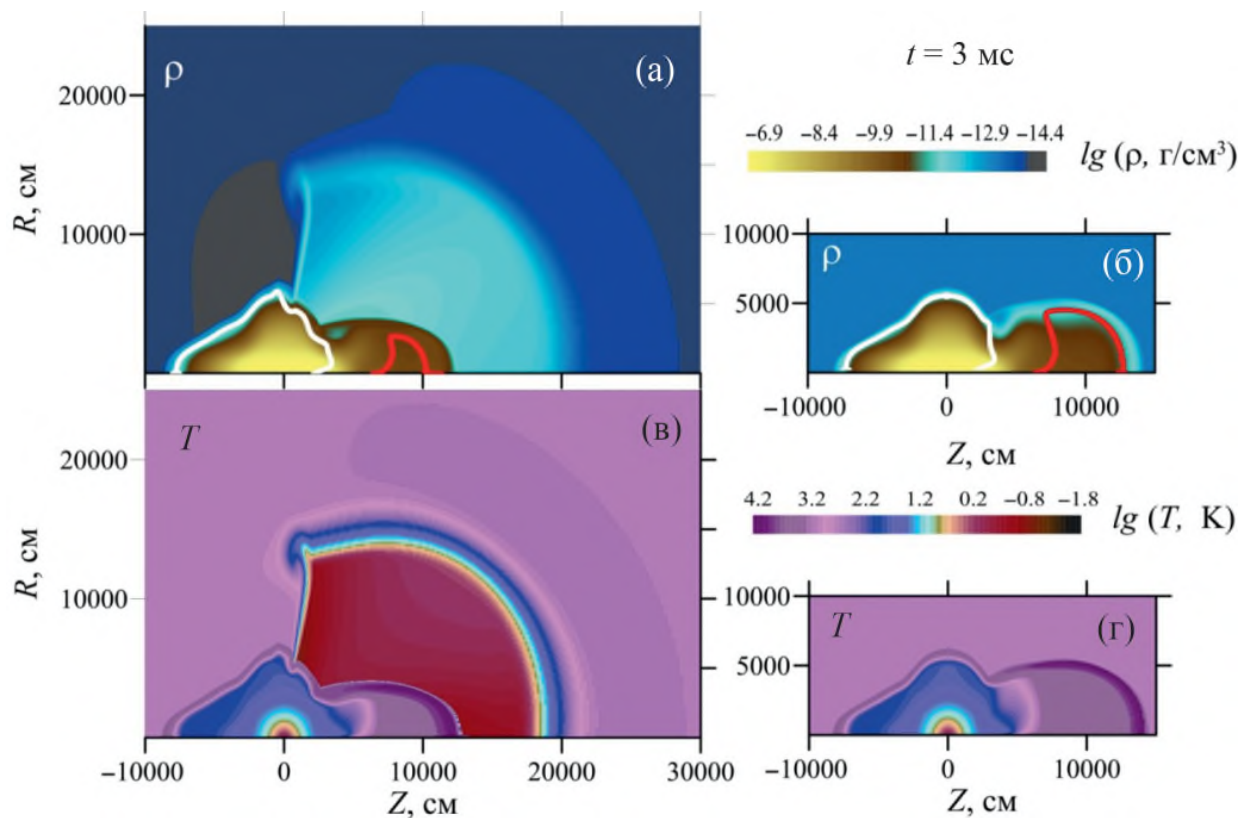


Рис. 4. Пространственные распределения плотности ρ и температуры T в момент времени 3 мс: (а, в) соответствуют эксперименту “Северная звезда-I”, а (б, г) — “Северная звезда-II”. Белые кривые — граница продуктов взрыва, красные — алюминиевых паров.

образования рассчитывались в каждый момент времени независимым интегрированием стационарных уравнений переноса излучения вдоль совокупности большого количества лучей, проходящих в точку наблюдения через расчетную область [21]. Направление луча соответствует единичному вектору Ω . Дифференциальное уравнение переноса теплового излучения, описывающее распространение излучения вдоль луча имеет вид

$$\frac{\partial I_\epsilon}{\partial s} + k_\epsilon I_\epsilon = k_\epsilon B_\epsilon, \quad (2)$$

где

$$B_\epsilon = \frac{15}{\pi^5} \frac{\sigma \epsilon^3}{\exp(\epsilon/T) - 1}.$$

Здесь I_ϵ — спектральная интенсивность излучения, зависящая от пространственных координат, времени, энергии фотонов ϵ и направления их распространения, k_ϵ — спектральный коэффициент поглощения излучения, исправленный на вынужденное испускание, B_ϵ — равновесная интенсивность излучения, $\sigma = 0.1029 \text{ МВт}/(\text{см}^2 \text{эВ}^4)$ — постоянная Стефана–Больцмана. Для групповой интенсивности излучения $I_i = \int_{\epsilon_{i,1}}^{\epsilon_{i,2}} I_\epsilon d\epsilon$, уравнение переноса излучения вдоль луча формулируется следующим образом:

$$\frac{\partial I_i}{\partial s} + k_{pi} I_i = k_{pi} B_i, \quad k_{pi} = \frac{\int_{\epsilon_{i,1}}^{\epsilon_{i,2}} k_\epsilon B_\epsilon d\epsilon}{\int_{\epsilon_{i,1}}^{\epsilon_{i,2}} B_\epsilon d\epsilon}, \quad (3)$$

$$B_i = \int_{\epsilon_{i,1}}^{\epsilon_{i,2}} B_\epsilon d\epsilon, \quad q_i = \int I_i \Omega d\Omega.$$

Здесь $\epsilon_{i,1}$ и $\epsilon_{i,2}$ — границы i -й группы по энергиям фотонов, q_i — вектор групповой плотности потока излучения, $d\Omega$ — элемент телесного угла около единичного вектора Ω . Зависимости $k_\epsilon = k_\epsilon(T, \rho, \epsilon)$, характеризующие оптические свойства алюминия, воздуха и вещества продуктов взрыва, рассчитывались с использования кода FRONT по модели астрофизической плазмы [25]. При этом учитывался вклад в поглощение от свободно-свободных (тормозное излучение), свободно-связанных (фотоэффект), связанно-связанных (линии) электронных переходов с использованием атомных данных NIST [26] и таблиц [27].

На рис. 5 приведена схема расположения точек наблюдения при расчете оптических параметров плазменных образований. Здесь точка C соответствует расположению модуля OSP. Угол θ — угол между лучом и осью симметрии OC .

Расчеты зависимостей от времени плотностей потоков излучения $q_i(t)$ (кривых светимости) проводились с помощью решения стационарных уравнений

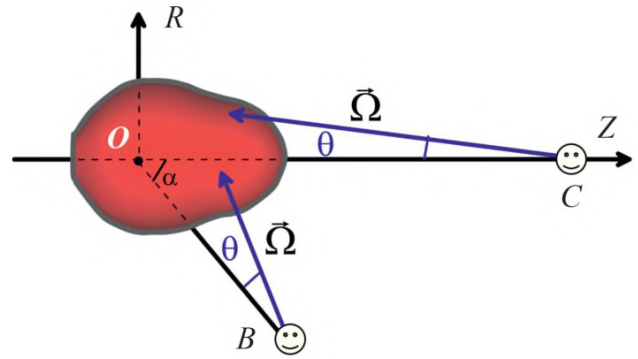


Рис. 5. Схема расположения точек наблюдения при расчете оптических параметров плазменных образований.

переноса излучения (3) для каждого момента времени вдоль 500 лучей (значений угла θ) проходящих через область плазменного образования, с последующим интегрированием по телесному углу, охватывающему эту область. Рис. 6 демонстрирует сравнение расчетных кривых светимости с имеющимися данными показаний двух фотометров: рис. 6а — HS1 (диапазон длин волн 0.7–0.8 мкм и границы группы по энергиям фотонов в расчетах $\epsilon_{i,1} = 1.55 \text{ эВ}$ и $\epsilon_{i,2} = 1.77 \text{ эВ}$ соответственно) и рис. 6б — LS1 (диапазон длин волн 0.382–0.418 мкм и границы группы по энергиям фотонов в расчетах $\epsilon_{i,1} = 2.96 \text{ эВ}$ и $\epsilon_{i,2} = 3.26 \text{ эВ}$ соответственно). Синим цветом обозначены результаты расчетов, красным — результаты измерений. Цифры (1, 2, 5, 6) соответствуют данным эксперимента “Северная звезда-I”, а (3, 4, 7, 8) — “Северная звезда-II”. Предварительная обработка данных измерений выполнялась трехточечным медианным фильтром. На кривых 4, 6, 8 показаны средние (по трем точкам) отклонения от медианных значений. Как видно из сравнения расчетных данных по кривым светимости, отличие величин плотностей потоков излучения в двух экспериментах более, чем на порядок, превышает влияние расстояний до OSP-модулей (2.5 раза), что присуще и данным экспериментов. В [11] этот факт назван “необъясненным”. Если учесть относительную упрощенность физической модели, существенную неопределенность в расчетах спектроскопических свойств алюминия, воздуха, и продуктов взрыва, особенно при низких плотностях и температурах, а также не вполне достоверные показания измерительной аппаратуры, результаты расчетов хорошо согласуются с данными измерений по кривым светимости в рассматриваемых двух диапазонах длин волн.

Заметим, что расположение научных модулей в обоих экспериментах и их размеры (радиус ~40 см) были такими, что самые близкие к OSP модулям — модули с аппаратурой для плазменных измерений PDP (Plasma Diagnostic Payload), которые находились на расстоя-

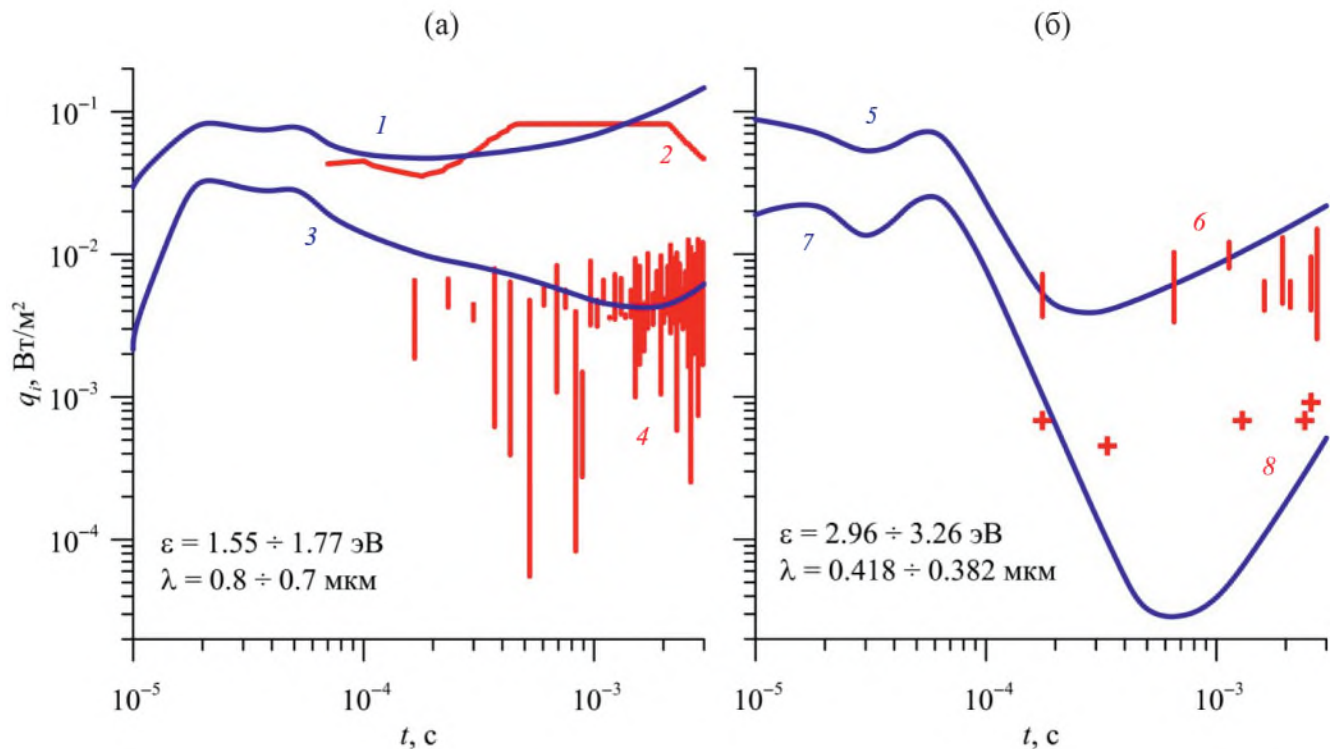


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных кривых светимости: (а) соответствует диапазону длин волн фотометра HS1 0.7–0.8 мкм, (б) — диапазону длин волн фотометра LS1 0.382–0.418 мкм. Синим цветом обозначены результаты расчетов, красным — результаты измерений. Цифры (1, 2, 5, 6) соответствуют данным эксперимента “Северная звезда-I”, а (3, 4, 7, 8) — “Северная звезда-II”.

нии 468 м в эксперименте “Северная звезда-I” и 537 м в эксперименте “Северная звезда-II” от OSP [11], перекрывали свечение плазменных струй вплоть до времен порядка 40 мкс, что заметно по данным измерений. На рис. 7 показаны расчетные зависимости от угла θ интенсивностей излучения I_i в момент времени 40 мкс. Здесь синие кривые соответствуют эксперименту “Северная звезда-I”, черные — эксперименту “Северная звезда-II”. Как видно из рисунка, свечение плазменного образования ограничено углом $\theta \sim 0.04^\circ$ для первого и $\theta \sim 0.02^\circ$ для второго эксперимента. Рис. 7а относится к диапазону датчика HS1, рис. 7б — LS1. Эти значения углов как раз соответствуют оценкам углов “слепой зоны” датчиков на OSP модулях. При расчете кривых светимости “слепая зона” не учитывалась.

На рис. 8 приведены расчетные зависимости от угла θ интенсивностей излучения I_i для двух диапазонов датчиков HS1 (рис. 8а) и LS1 (рис. 8б) в момент времени 3 мс. Группы кривых (1) и (2) соответствуют эксперименту “Северная звезда-I”, (3) и (4) — эксперименту “Северная звезда-II”. Красные кривые — свечение алюминиевых паров, черные — продуктов взрыва, синие — воздуха. Хорошо видно, что излучение при наблюдении из точки С (см. схему рис. 5) определяется свечением алюминиевых паров.

При наблюдении сбоку (в экспериментах были получены изображения со спутника MSX в видимом

диапазоне длин волн, начиная со времени 17 мс [11]) картина свечения отличается от соответствующей картины при наблюдении с торца. Для получения изображения из точки наблюдения В (см. схему рис. 5) стационарное уравнение переноса излучения (3) решалось вдоль миллиона лучей, проходящих через возмущенную область и попадающих в точку наблюдения В, являющуюся началом координат сферической системы координат (r, θ, φ) , где r — расстояние вдоль луча до начала координат, θ и φ — зенитный и азимутальный углы соответственно [21]. При переходе к этой системе координат плоскость датчика выбиралась в качестве фундаментальной плоскости, которой принадлежит точка наблюдения, зенитный угол θ — это угол между перпендикуляром к фундаментальной плоскости, проведенным из точки наблюдения и направленным на возмущенную область, и направлением луча, который соответствует единичному вектору Ω , азимут φ — угол между произвольно выбранным лучом на фундаментальной плоскости с началом в точке наблюдения и проекцией рассматриваемого луча на эту плоскость. Большое число лучей необходимо для того, чтобы достаточно точно описать перенос излучения в возмущенной области, представляющей собой сложное распределение участков различной плотности и температуры. Достаточная плотность лучей позволяет избежать “эффекта луча”, т.е. пропуск области яркого свечения, которая может внести значи-

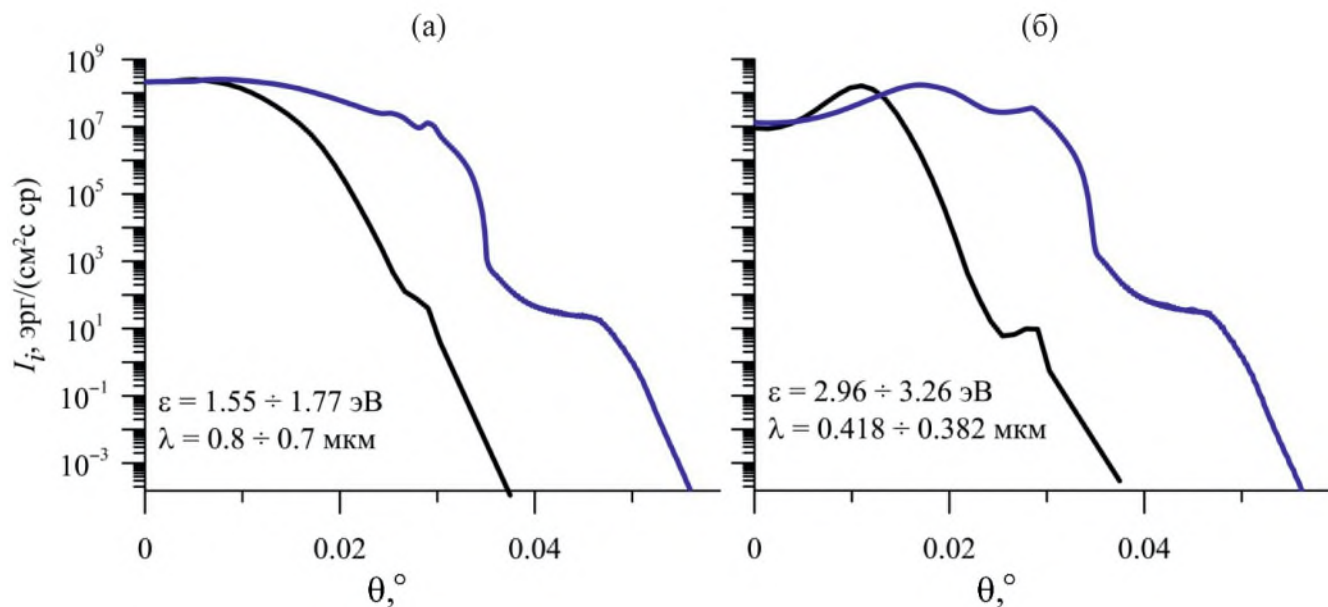


Рис. 7. Расчетные зависимости от угла θ интенсивностей излучения I_i в момент времени 40 мкс. Здесь синие кривые соответствуют эксперименту “Северная звезда-I”, черные — эксперименту “Северная звезда-II”: (а) соответствует диапазону длин волн фотометра HS1 0.7–0.8 мкм, (б) — диапазону длин волн фотометра LS1 0.382–0.418 мкм.

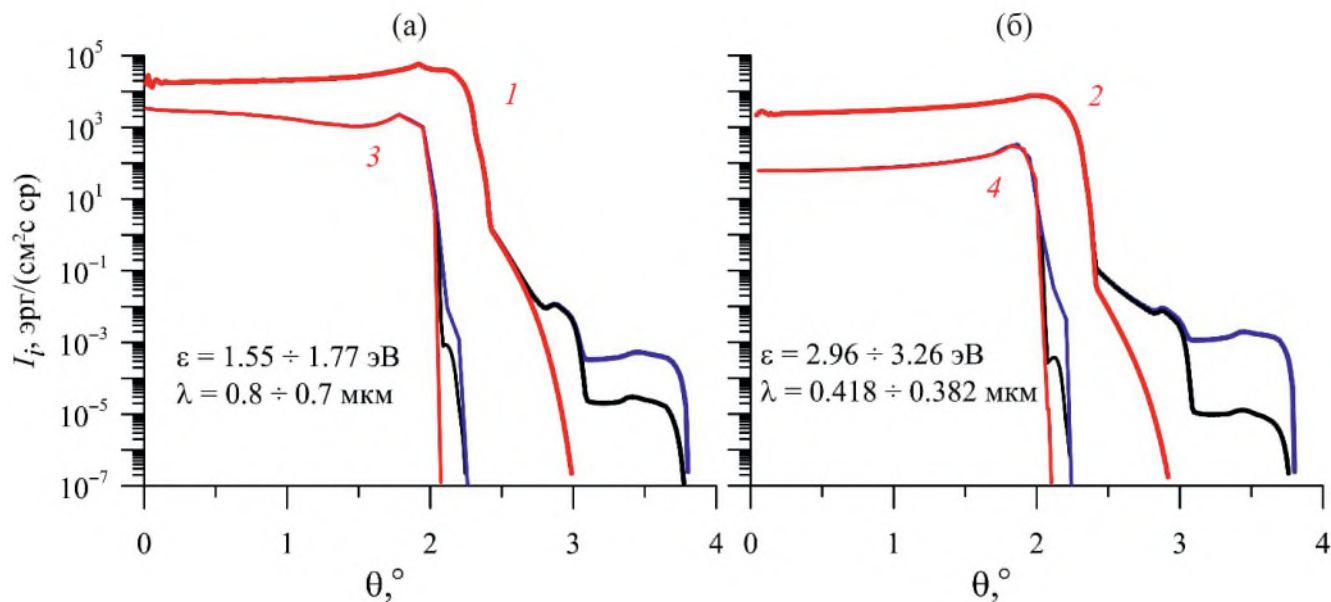


Рис. 8. Расчетные зависимости от угла θ интенсивностей излучения I_i для двух диапазонов датчиков HS1 (а) и LS1 (б) в момент времени 3 мс. Группы кривых (1) и (2) соответствуют эксперименту “Северная звезда-I”, (3) и (4) — эксперименту “Северная звезда-II”. Красные кривые — свечение алюминиевых паров, черные — продуктов взрыва, синие — воздуха.

тельный вклад в плотность потока излучения, что может исказить результаты расчетов. На рис. 9 представлены расчетные изображения плазменных образований при наблюдении из точки B при угле $\alpha = 45^\circ$ с расстояния 1 км от точки O в видимом диапазоне энергий фотонов $\varepsilon = 1.55\text{--}3.26$ эВ (или длин волн $\lambda = 0.8\text{--}0.38$ мкм) в момент времени 3 мс разлета плазменного образования, моделирующего эксперимент “Северная звезда-I” (рис. 9а) и “Северная звезда-II”

(рис. 9б). На рисунках белым цветом показаны значения соответствующих плотностей потоков излучения. Как видно из рисунков, используемый алгоритм расчета позволяет получать объемные изображения плазменных образований. Для сравнения на рис. 10 приведены аналогичные изображения в видимом диапазоне энергий фотонов при наблюдении из точки C при угле $\alpha = 0^\circ$ с того же расстояния 1 км от точки O , что и на предыдущем рисунке. Здесь плотности потоков излу-

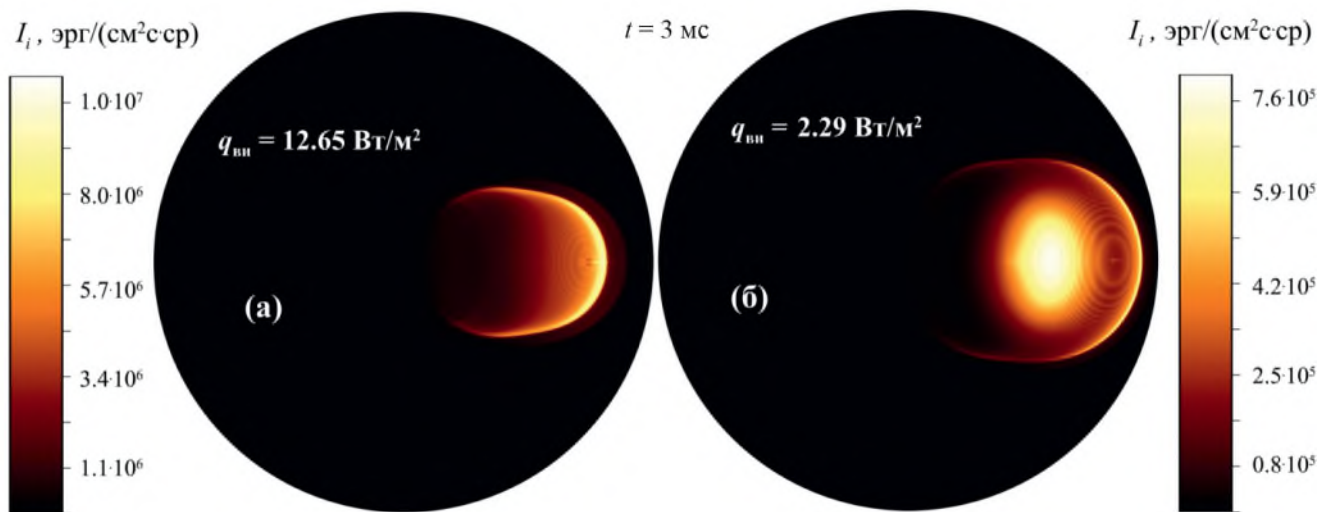


Рис. 9. Изображения плазменных образований в видимом диапазоне длин волн $\lambda = 0.8\text{--}0.38$ мкм при наблюдении из точки В при угле $\alpha = 45^\circ$ с расстояния 1 км от точки О в момент времени 3 мс разлета плазменного образования, моделирующего эксперимент “Северная звезда-I” (а) и “Северная звезда-II” (б).

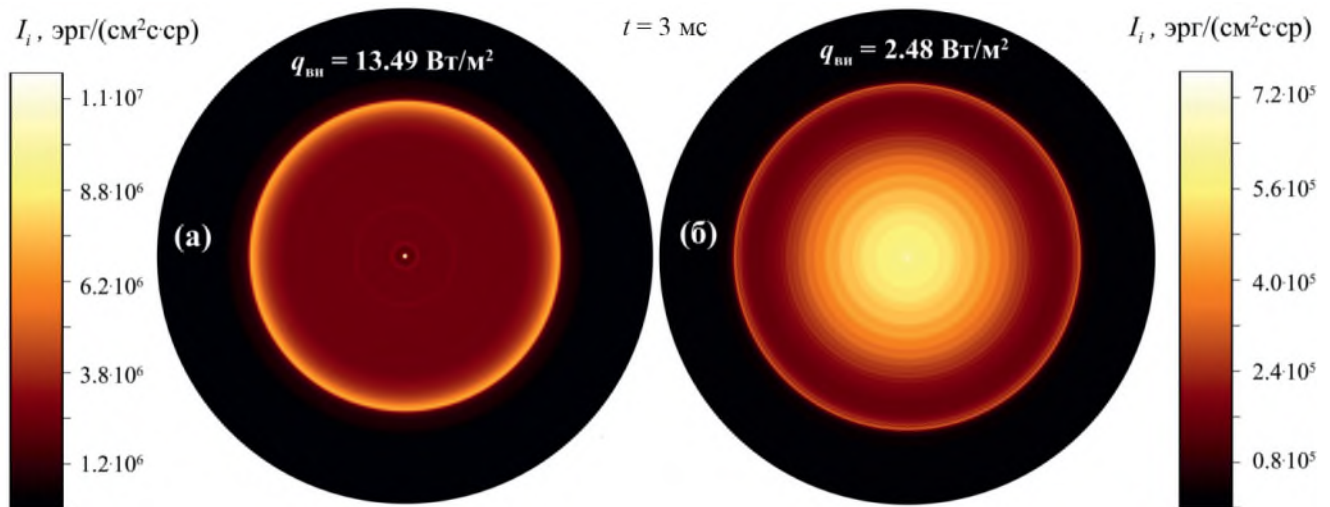


Рис. 10. Изображения плазменных образований в видимом диапазоне длин волн $\lambda = 0.8\text{--}0.38$ мкм при наблюдении из точки С при угле $\alpha = 0^\circ$ с расстояния 1 км от точки О в момент времени 3 мс разлета плазменного образования, моделирующего эксперимент “Северная звезда-I” (а) и “Северная звезда-II” (б).

чения на $\sim 6\text{--}7\%$ превышают соответствующие плотности потоков при наблюдении сбоку. Но, и в том, и в другом случае свечение плазменного облака в эксперименте “Северная звезда -I” более, чем в 5.5 раз интенсивнее, чем в эксперименте “Северная звезда -II”.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые выполнено численное моделирование динамики разлета плазменных образований, созданных взрывными генераторами плазменных струй ВГПС-400 в активных ракетных экспериментах “Северная звезда I” и “Северная звезда II”, отличающихся высьами экспериментов и предварительным (перед ин-

жекцией высокоскоростной алюминиевой плазменной струи) выпуском сухого воздуха в первом случае. Получены пространственные распределения газодинамических параметров плазмы (воздух + Al + продукты взрыва) в различные моменты времени вплоть до миллисекундных времен. Проведено сравнение величин этих параметров для двух экспериментов. Показано, что наличие воздушного облака сдерживает разлет алюминиевой плазмы, особенно на стадии ее инжекции (до 25 мкс).

С помощью численного моделирования получены оптические характеристики плазменных образований. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных кривых светимости в диапазоне длин

волн 0.7–0.8 мкм (фотометр HS1) и 0.382–0.418 мкм (фотометр LS1) для обоих экспериментов “Северная звезда I” и “Северная звезда II”, которое показало хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных. Расчеты показали, что датчики на оптических модулях OSP фиксировали свечение алюминиевой плазмы, при этом вклад вещества продуктов взрыва и воздуха оказался незначительным.

Приводятся изображения плазменных образований в видимом диапазоне длин волн при наблюдении сбоку и с торца с расстояния 1 км в момент времени 3 мс.

В работе исследовалась общая динамика крупномасштабного плазменного образования на гидродинамических временах. В то же время физические условия могут способствовать развитию таких эффектов, как, например, конденсация вещества и образование пылевых частиц [28, 29], разделение температур ионов и электронов [30, 31], вытеснение заряженными частицами магнитного поля [32] и др. Улучшение плазменной модели является предметом будущих исследований.

В заключении можно сделать вывод о том, что используемая сравнительно простая физикоматематическая модель начальной стадии разлета плазменных образований на различных высотах ионосферы Земли может применяться для прогноза газодинамических и оптических параметров искусственных плазменных струй.

Проведенные в работе систематизация и анализ данных активных экспериментов “Северная звезда I” и “Северная звезда II” могут составить базис для тестирования активно развивающихся в настоящее время современных подходов для описания динамики плазмы, например, гибридные модели [33, 34], метод частиц [35, 36], прямое кинетическое моделирование [37].

Работа выполнена в рамках государственного задания № FMWN-2022-0021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоцерковский М.Б., Гурвич А.В., Евтушевский А.М., Киселев Ю.Н., Милиневский Г.П., Романовский Ю.А., Христофоров Б.Д., Фейгин В.М. // Космич. исслед. 1993. Т. 31. С. 32.
2. Адушкин В.В., Зецер Ю.И., Киселев Ю.Н., Немчинов И.В., Христофоров Б.Д. // ДАН АН СССР. 1993. Т. 31. С. 486.
3. Адушкин В.В., Зецер Ю.И., Гаврилов Б.Г., Грыцкиев И.В., Киселев Ю.Н., Романовский Ю.А., Рыбаков В.А., Менг Ч.-И., Эрландсон Р., Стоянов Б. // ДАН РФ. 1998. Т. 361. С. 818.
4. Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Подгорный А.И., Подгорный И.М., Собянин Д.Б. // 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.
5. Киселев Ю.Н., Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Поклад Ю.В., Рыбаков В.А. // 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.
6. Киселев Ю.Н., Зецер Ю.И., Поклад Ю.В., Рыбаков В.А. // Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках Земли (геофизика сильных возмущений). Сб. научн. тр. М.: ИДГ РАН, 2002. С. 323.
7. Gavrilov B.G., Podgorny I.M., Sobyannin D.B., Zetzer J.I., Erlandson R.E., Meng C.I., Pfaff R.F., Lynch K.A. // J. Spacecr. Rockets. 2004. V. 41. P. 490.
8. Lynch K.A., Torbert R. B., Chutter M., Erlandson R. E., Meng C. I., Zetzer J. I., Gavrilov B. G., Kiselev Y.N. // J. Spacecraft Rockets. 2004. V. 41. P. 496.
9. Pfaff R. F., Freudenreich H. T., Bounds S., Peter A. Delamere P.A., Erlandson R.E., Meng C.I., Zetzer J.I., Gavrilov B.G. // J. Spacecraft Rockets. 2004. V. 41. P. 521.
DOI: 10.2514/1.11945.
10. 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. // J. Spacecraft Rockets. 2004. V. 41. P. 483.
11. Зецер Ю.И., Поклад Ю.В., Эрландсон Р.Е. // Физика земли. 2021. № 5. С. 184.
DOI: 10.31857/S0002333721050227.
12. Swenson C.M., Kelley M.C., Primdahl F., Baker K.D. // Geophys. Res. Lett. 1990. V. 17. P. 2337.
13. Swenson C.M., Kelley M.C., Brenning N., Torbert R.B., Primdahl F., Baker K.D. // Adv. Space Res. 1992. V. 12. P. 65.
14. Лосева Т.В., Голубь А.П., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И. // Динамические процессы в геосферах. М.: ИДГ РАН, 2021. № 13. С. 175.
Doi: 10.26006/22228535_2021_1_175.
15. Лосева Т.В., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Урвачев Е.М. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 956.
Doi: 10.31857/S0367292122600583.
16. Denavit J. // Phys. Fluids. 1979. V. 22. P. 1384.
Doi: 10.1063/1.862751.
17. Werner G.R., Uzdensky D.A., Begelman M.C., Cerutti B., Nalewajko K. // Monthly Notices Royal Astron. Soc. 2018. V. 473. P. 4840.
Doi: 10.1093/mnras/stx2530.
18. Lobok M., Brantov A., Bychenkov V.Y. // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. № 12.
Doi: 10.1063/1.5125968.
19. Lobok M., Andriyash I.A., Vais O., Malka V., Bychenkov V.Y. // Phys. Rev. E. 2021. V. 104. P. L053201.

- Doi: 10.1103/PhysRevE.104.L053201.
20. Урвачев Е.М., Лосева Т.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 1118. Doi: 10.31857/S0367292123601145.
 21. Лосева Т.В., Урвачев Е.М., Зецер Ю.И., Ляхов А.Н., Косарев И.Б., Поклад Ю.В. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 797. Doi: 10.31857/S0367292123600450.
 22. Glazyrin S. I., Brantov A. V., Rakitina M. A., Bychenkov V. Yu. // High Energy Density Physics. 2020. V. 36. P. 100824. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574181820300707>.
 23. Urvachev E. M., Shidlovski D. S., Blinnikov S. I., Glazyrin S. I. // Astron. Lett. 2023. V. 49. P. 445. Doi: 10.1134/S1063773723080042.
 24. Toro E. F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction. Springer Science & Business Media, 2013.
 25. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.
 26. Ralchenko Y., Fuh, J., Jou F., Martin W., Podobedova L., Reader J., Sansonetti J., Wiese W. NIST Atomic Spectra Database (2006). 2006. <http://physics.nist.gov/asd3>.
 27. Kurucz R. L. // Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica. 1992. V. 23. P. 181. <https://adsabs.harvard.edu/full/1992RMxAA..23..>
 - 181K.
 28. Popel S. I., Gisko A. A., Golub' A. P., Losseva T. V., Bingham R., Shukla P. K. // Phys. Plasmas. 2000. V. 7. P. 2410.
 29. Лосева Т. В., Понель С. И., Голубь А. П. // Физика плазмы. 2020. Т. 46. С. 1007.
 30. Bartosiewicz Y., Proulx P., Mercadier Y. // J. Phys. D: Applied Phys. 2002. V. 35. P. 2139.
 31. Кузьмичева М.Ю. // Динамические процессы в геосферах. 2018. № 10. С. 185. Doi: 10.26006/IDG.2018.10.20195.
 32. Ковалева И.Х., Ковалев А.Т. // Динамические процессы в геосферах. 2021. № 13. С. 158. Doi: 10.26006/22228535_2021_1_158.
 33. Belyaev M. A., Larson D. J., Cohen B. I., Clark S. E. // Phys. Plasmas. 2024. V. 31. P. 012902. Doi: 10.1063/5.0177132.
 34. Kropotina J. A., Petrukovich A. A., Chugunova O. M., Bykov A. M. // Monthly Notices Royal Astron. Soc. 2023. V. 524. P. 2934. Doi: 10.1093/mnras/stad2038.
 35. Dikalyuk A. S., Kuratov S. E. // Math Models Comput Simul. 2018. No. 10. P. 198. Doi: 10.1134/S2070048218020059.
 36. Le A., Stanier A., Yin L., Wetherston B., Keenan B., Albright B. // Phys. Plasmas. 2023. V. 30. P. 063902. Doi: 10.1063/5.0146529.
 37. Карнов С. А., Потапенко И. Ф. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. С. 890.

DYNAMICS OF THE EXPANSION OF ARTIFICIAL PLASMA FORMATIONS IN EARTH'S IONOSPHERE

T. V. Losseva^{a,b,*}, E. M. Urvachev^{a,b,c}, E. S. Goncharov^{a,b}, and A. N. Lyakhov^{a,b}

^aSadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia

^bDukhov Research Institute of Automatics, Moscow, 127055 Russia

^cNational Research Center "Kurchatov Institute," Moscow, 123182 Russia

*e-mail: Tatiana.Losseva@gmail.com

The paper presents the results of numerical simulation of the initial stage of expansion of plasma formations resulting from the injection of high-speed aluminum plasma jets into the Earth's ionosphere at different altitudes corresponding to two "North Star" experiments. The influence of an artificial atmosphere represented by an air cloud on the plasma formation parameters in the North Star-I experiment is studied. Gas-dynamic parameters of plasma formations and their optical characteristics are determined. We present a comparison of the calculation results with the results of measurements of the luminosity curves in two wavelength ranges of photometers, which shows good agreement between the calculated and experimental data.

Keywords: active rocket experiments in the ionosphere, high-speed aluminum plasma jet, explosive plasma generators, numerical simulation, optical characteristics of plasma formation