

ОПТИЧЕСКИЕ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ "СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА I" И "СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА II"

Лосева Т.В.^{1,2}, Урвачев Е.М.^{1,2}, Гончаров Е.С.^{1,2}, Ляхов А.Н.^{1,2}

¹Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия, losseva@idg.ras.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия



ВВЕДЕНИЕ

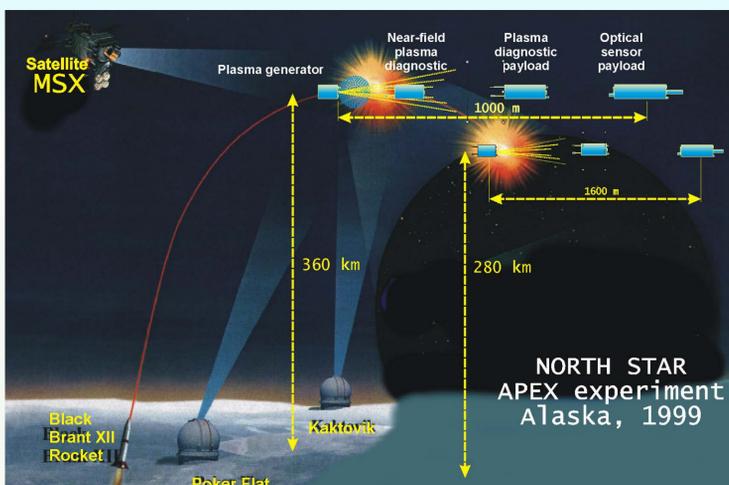
Актуальной проблемой настоящего времени является разработка физических и прогностических моделей процессов, сопровождающих разлет плазменного образования на различных ионосферных высотах. Для верификации теоретических моделей динамики свободной плазмы, которую невозможно осуществить в условиях лабораторного эксперимента, целесообразно использовать результаты проведенных ранее активных геофизических ракетных экспериментов с инъекцией высокоскоростных плазменных струй в ионосферу Земли.

В экспериментах "Флаккус" (высота 140 км) и "Северная звезда I(II)" (360 и 280 км, соответственно) для инъекции струй алюминиевой плазмы использовались созданные в ИДГ РАН взрывные плазменные генераторы ВГПС с максимальной энергией плазмы 6 МДж.

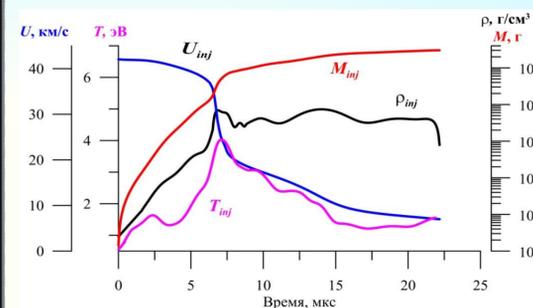
Результаты численного моделирования начальной стадии динамики плазмы в экспериментах "Флаккус" и "Северная звезда II" (без учета последующего за инъекцией разлета продуктов взрыва) приведены в работах [1, 2]. В отличие от этих экспериментов, в эксперименте "Северная звезда I" непосредственно перед инъекцией алюминиевой плазмы перед генератором плазменной струи был выпущен сухой воздух для исследования влияния нейтральной фоновой атмосферы на параметры струи. После окончания инъекции в обоих экспериментах начинался разлет продуктов взрыва генератора.

Цель настоящей работы: исследование влияния на динамику плазмы выпуска сухого воздуха в эксперименте «Северная звезда I (NS1)» и разлета продуктов взрыва как в эксперименте «Северная звезда I (NS2)», так и в эксперименте «Северная звезда II». Численное моделирование этих процессов выполнялось с помощью радиационно-газодинамического кода FRONT [3], основанного на явной схеме гудуновского типа на фиксированной эйлеровой сетке (RZ геометрия). Этот код использовался и для расчета таблиц термодинамических и оптических свойств алюминия, воздуха и продуктов взрыва.

ПОЛЕТНАЯ СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТОВ «СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА»



РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИНЖЕКЦИИ АЛЮМИНЕВОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ



Полученные в расчетах [2] зависимости от времени газодинамических параметров струи при ее вылете из сопла генератора ВГПС-400, используемого в экспериментах «Северная звезда» Здесь M_{inj} - инжектируемая масса алюминиевых паров, U_{inj} - их скорость, ρ_{inj} - плотность, T_{inj} - температура.

Этот «сценарий инъекции» показал хорошее согласие данных расчетов с имеющимися данными измерений в лабораторных экспериментах. Алгоритм получения параметров инъекции приведен в работе [1].

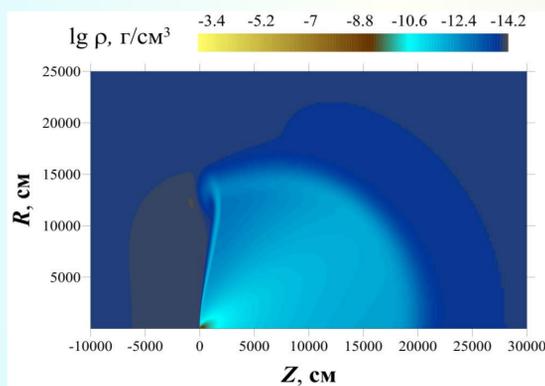
ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАТОРА ВГПС-400	
Полная масса, кг	33.0
Масса ВВ, кг	9.7
Масса струи, г	30
Кинетическая энергия струи, МДж	6
Начальная скорость струи, км/с	42 - 7

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

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) для эксперимента «Северная звезда I»
2. Через 200 мс инъекция алюминиевой струи в воздух с полученными параметрами по сценарию, приведенному выше 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.

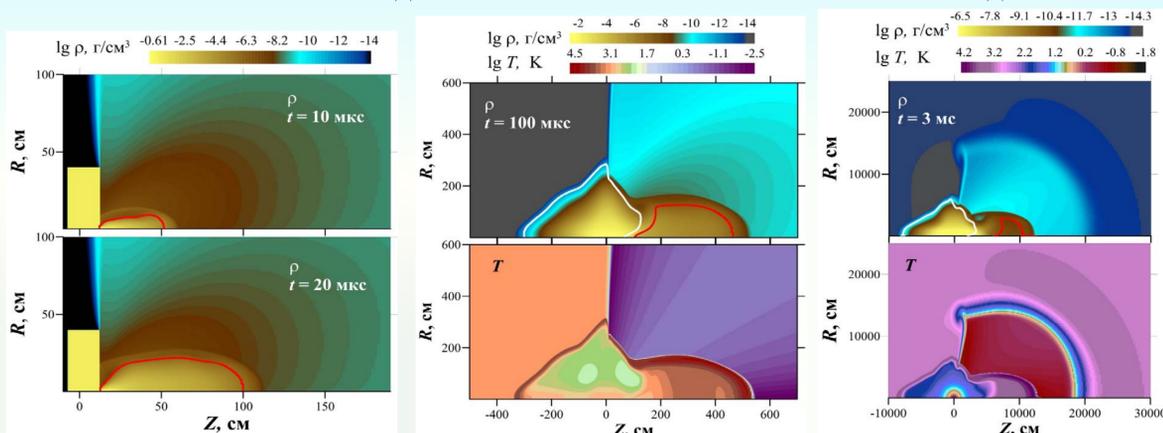
Граничные условия:

левая грань – стенка диска с радиусом ~40 см и высотой ~20 см, остальные грани – свободные границы

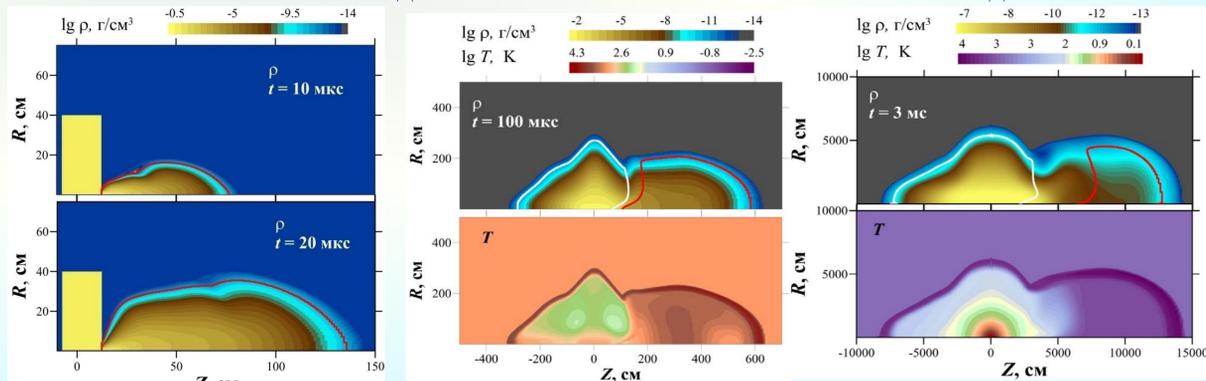


Пространственное распределение плотности выпущенного воздуха через 200 мс

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТА «СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА I»

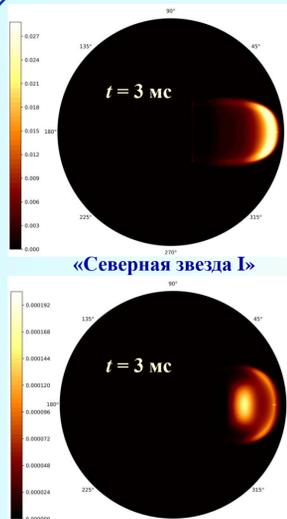


РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТА «СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА II»

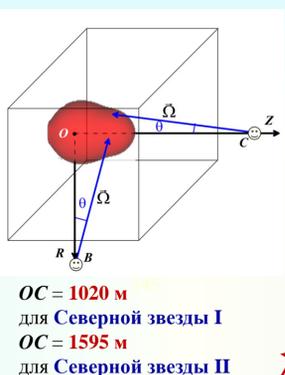


Красными кривыми выделена граница алюминия, белыми - продуктов взрыва

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ



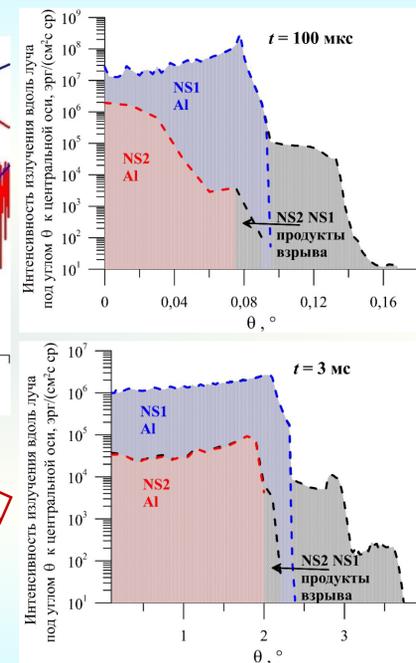
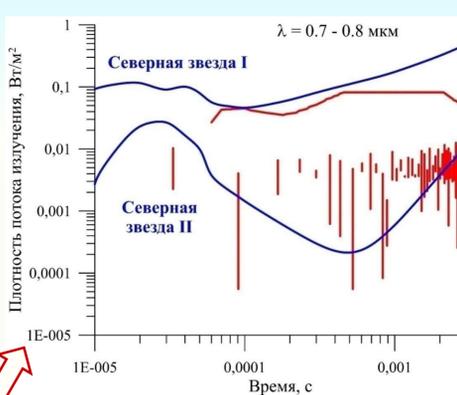
«Северная звезда I»
«Северная звезда II»
Изображение свечения плазмы в видимом диапазоне длин волн при наблюдении из точки В.
OB = 1 км.



OC = 1020 м для Северной звезды I
OC = 1595 м для Северной звезды II

Сравнение расчетных зависимостей от времени плотностей потоков излучения в диапазоне длин волн 0.7 – 0.8 мкм с данными фотометров, установленных на оптических модулях OSP – наблюдение из точки С. Здесь синие кривые – расчет, красные – эксперимент.

На рисунках справа представлены интенсивности излучения в диапазоне 0.7 – 0.8 мкм в зависимости от угла θ между направлением луча Ω и осью OZ при наблюдении из точки С. Видно, что основной вклад в излучение вносит алюминиевая плазма.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые выполнено численное моделирование динамики плазмы, созданной взрывными генераторами плазменных струй ВГПС-400 в активных ракетных экспериментах «Северная звезда I» и «Северная звезда II», отличающихся высотами экспериментов и предварительным (перед инъекцией) выпуском сухого воздуха в первом случае.

Получены пространственные распределения газодинамических параметров плазмы (воздух + Al + продукты взрыва) в различные моменты времени до миллисекундных времен.

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

Расчетные зависимости от времени плотности потока излучения в диапазоне длин волн 0.7-0.8 мкм согласуются с соответствующими данными наблюдений с оптического модуля OSP для обоих экспериментов "Северная Звезда I" и "Северная Звезда II".

Литература:

[1] Лосева Т.В., Голубь А.П., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И. Характеристики плазменной струи взрывного генератора в экспериментах «Флаккус»: измерения и численное моделирование // Динамические процессы в геосферах / М.: ИДГ РАН, 2021. № 13. С. 175-186. DOI: 10.26006/22228535_2021_1_175
[2] Лосева Т.В., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Урвачев Е.М. Численное моделирование начальной стадии динамики высокоскоростной плазменной струи в активных геофизических ракетных экспериментах "Флаккус" и "Северная звезда" // Физика плазмы, 2022, том 48, с. 956-961, DOI: 10.31857/S0367292122600583
[3] Urvachev E.M., Blinnikov S.I., Glazyrin S.I., Shidlovski D.S. Comparative modeling of the 2012b outburst of supernova 2009ip // Astronomy Letters. – 2023. – Т. 49. – №. 8. – С. 454-464.