

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ДИНАМИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В АКТИВНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ “ФЛАКСУС” И “СЕВЕРНАЯ ЗВЕЗДА”

© 2022 г. Т. В. Лосева^{a, b, *}, И. Б. Косарев^a, Ю. В. Поклад^a, А. Н. Ляхов^{a, b},
Ю. И. Зецер^a, Е. М. Урвачев^{b, c}

^a Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, Москва, Россия

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

^c Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Москва, Россия

*e-mail: tatiana.losseva@gmail.com

Поступила в редакцию 31.05.2022 г.

После доработки 07.06.2022 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

Получены зависимости от времени газодинамических параметров высокоскоростной алюминиевой плазменной струи при ее инжекции в ионосферу на высотах 140–300 км с помощью взрывных плазменных генераторов ВГПС. Результаты численного моделирования начальной стадии динамики плазмы струи согласуются с данными измерений газодинамических и радиационных характеристик плазмы в лабораторных и ионосферных экспериментах.

Ключевые слова: высокоскоростная алюминиевая плазменная струя, активные ракетные эксперименты в ионосфере, кумулятивные взрывные плазменные генераторы, численное моделирование, тепловое излучение струи

DOI: 10.31857/S0367292122600583

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1990-х гг. был проведен ряд российских и российско-американских активных геофизических ракетных экспериментов с инжекцией высокоскоростных плазменных струй в ионосферу Земли. Целью этих экспериментов являлось исследование и определение характеристик процессов взаимодействия плазменных потоков с окружающей средой и геомагнитным полем, процессов генерации ионосферных возмущений разных пространственных и временных масштабов. Инжекция плазменных струй с известными параметрами позволяет верифицировать теоретические модели взаимодействия потоков плазмы со средой в максимально контролируемых условиях эксперимента, выгодно отличаясь от анализа данных мониторинга естественных процессов.

В двух однотипных ионосферных экспериментах “Флаккус” геофизическая ракета стартовала под углом около 70° к поверхности Земли в восточном направлении. На высоте около 140 км от ракеты отделялся взрывной генератор плазменной струи, и в момент, когда генератор удалялся на ~130 м от измерительного модуля ракеты, происходила детонация взрывчатого вещества гене-

ратора с образованием струи плазмы, которая инжестировалась примерно вдоль местного геомагнитного поля в направлении модуля с бортовой научной аппаратурой. Кроме бортовой, часть аппаратуры наблюдения располагалась на поверхности Земли и на спутнике MSX. В период проведения экспериментов солнечные вспышки и сколько-нибудь заметные возмущения геомагнитного поля и околоземного космического пространства отсутствовали, и эксперименты проводились в спокойной гелиогеофизической обстановке.

Эксперименты “Северная звезда” проводились на высоких широтах. С полигона на Аляске с помощью геофизической ракеты была запущена полезная нагрузка, которая после разведения представляла собой четыре научных модуля. Эти модули выводились в собранном виде в заданную точку траектории, затем ориентировались так, чтобы ось инжектируемых струй была перпендикулярна местному геомагнитному полю. После этого производилось разделение модулей и осуществлялась инжекция плазмы. На первом модуле был установлен взрывной генератор для первой инжекции (“Северная звезда-1”, высота

364 км). На втором, кроме аналогичного генератора для второй инъекции (“Северная звезда-2”, высота 273 км), были установлены датчики для удаленной регистрации параметров струи при первой инъекции. Остальные два модуля были оснащены специализированной измерительной аппаратурой. Две инъекции были выполнены с интервалом времени ~ 155 с на одной траектории. Непосредственно до первой инъекции перед генератором плазменной струи было выпущено 12 г сухого воздуха для исследования влияния нейтральной атмосферы на ионизацию струи и сопоставления с результатами экспериментов “Флак-сус”. Также проводились оптические измерения со спутника MSX и из наземных пунктов с использованием высокоскоростных видеокамер, фотометров и спектрографов.

В ионосферных экспериментах для инъекции алюминиевых струй использовались созданные в ИДГ РАН кумулятивные взрывные плазменные генераторы (ВГПС-300 в экспериментах “Флак-сус” и ВГПС-400 в экспериментах “Северная звезда” [1]). Тестирование ВГПС проводилось в наземных экспериментах с использованием вакуумной камеры при давлении ~ 0.001 мм рт. ст. Схемы расположения в них датчиков, подробная постановка наземных и ионосферных экспериментов и результаты измерений приведены в [1–3].

Ранее при численном моделировании процессов взаимодействия струи с геомагнитным полем на поздней стадии ее динамики в [4] использовались искусственно заданные начальные условия. Вследствие недостаточно полной диагностики в ионосфере, особенно на начальной стадии динамики струи, существенным моментом является необходимость в численном моделировании этой начальной стадии, включающем определение зависимостей от времени газодинамических параметров алюминиевой плазмы при ее выходе из сопла генератора (сценарий инъекции). В [2, 3] был разработан простой алгоритм определения сценария инъекции, в котором использовались все имеющиеся данные измерений: газодинамические параметры на определенных расстояниях от сопла генератора в наземных экспериментах; кривые светимости, характеризующие тепловое излучение плазмы, полученные в ионосферных экспериментах с двух фотодиодов, расположенных на расстоянии 130 м от генератора.

2. МОДЕЛЬ

Используя экспериментальные данные начальной стадии (длительность ~ 100 мкс) движения плазменной струи, в [2, 3] проводилось решение обратной задачи, в которой определялся сценарий инъекции струи. Физико-математическая модель включает в себя систему уравнений ради-

ационной газодинамики (РГД) в лагранжевых координатах для сферически-симметричной геометрии, описывающую динамику конусообразной струи в процессе и после окончания инъекции из сопла генератора, диффузионное приближение для многогрупповых уравнений переноса излучения, включая потери за счет излучения с боковой поверхности конуса. Для расчета характеристик теплового излучения, испущенного горячей плазмой, стационарное дифференциальное уравнение переноса излучения интегрировалось вдоль лучей, попадающих на датчик, для всех значений энергий фотонов в диапазоне измерений фотодиодов во все моменты времени рассматриваемого диапазона. Граничные условия на срезе сопла задавались в виде зависимостей от времени газодинамических параметров алюминиевых паров (до времени окончания инъекции). После ее окончания, когда плазма отсеклась от генератора, на заднем (оторвавшемся от сопла) конце струи так же, как и на переднем крае струи, в течение всего рассматриваемого времени, задавалось давление, соответствующее сильно разреженному давлению окружающего воздуха на высоте эксперимента. Предполагалось, что алюминиевая плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия, что оправдано для плотной высокотемпературной плазмы струи. В расчетах использовались таблицы термодинамических и оптических свойств паров алюминия [5]. При решении системы РГД уравнений использовалась неявная абсолютно устойчивая полностью консервативная схема [6]. При решении уравнений переноса излучения использовалась разностная схема [7], позволяющая правильно описать теплообмен излучением между оптически толстыми и оптически тонкими слоями газа.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 1 представлены полученные в результате расчетов зависимости от времени газодинамических параметров в выходном сечении генераторов ВГПС-400 (сплошные кривые) и ВГПС-300 (штриховые кривые). Здесь M_{inj} – инжектируемая масса алюминиевых паров, U_{inj} – их скорость, ρ_{inj} – плотность, T_{inj} – температура. Различие приведенных сценариев объясняется различием основных исходных параметров. Если полная инжектируемая масса алюминия для ВГПС-400 составляла величину 30 г, а кинетическая энергия струи – 6 МДж, то для ВГПС-300 эти величины были равны 15 г и 3 МДж соответственно. В обоих случаях угловая направленность струи $\approx 20^\circ$ (что соответствует конусу с телесным углом 0.095 стерadian), в котором было сосредоточено $\approx 90\%$ от полной энергии и массы струи, радиус среза сопла составлял величину 1 см [3]. В

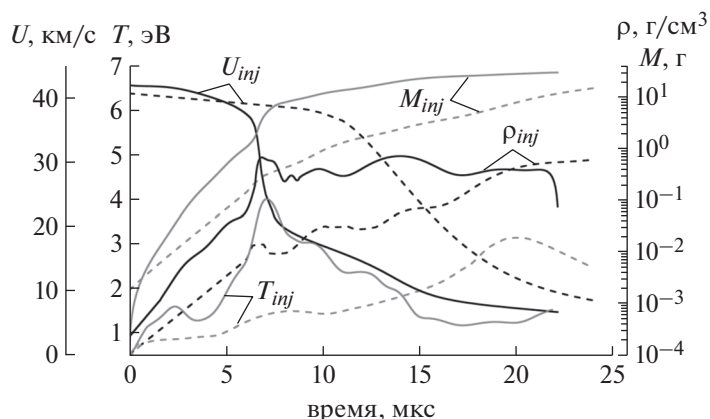


Рис. 1. Зависимости от времени газодинамических параметров струи при вылете из сопла генератора ВГПС-400 (сплошные кривые) и ВГПС-300 (штриховые кривые). Здесь M_{inj} – инжектируемая масса алюминиевых паров, U_{inj} – их скорость, ρ_{inj} – плотность, T_{inj} – температура.

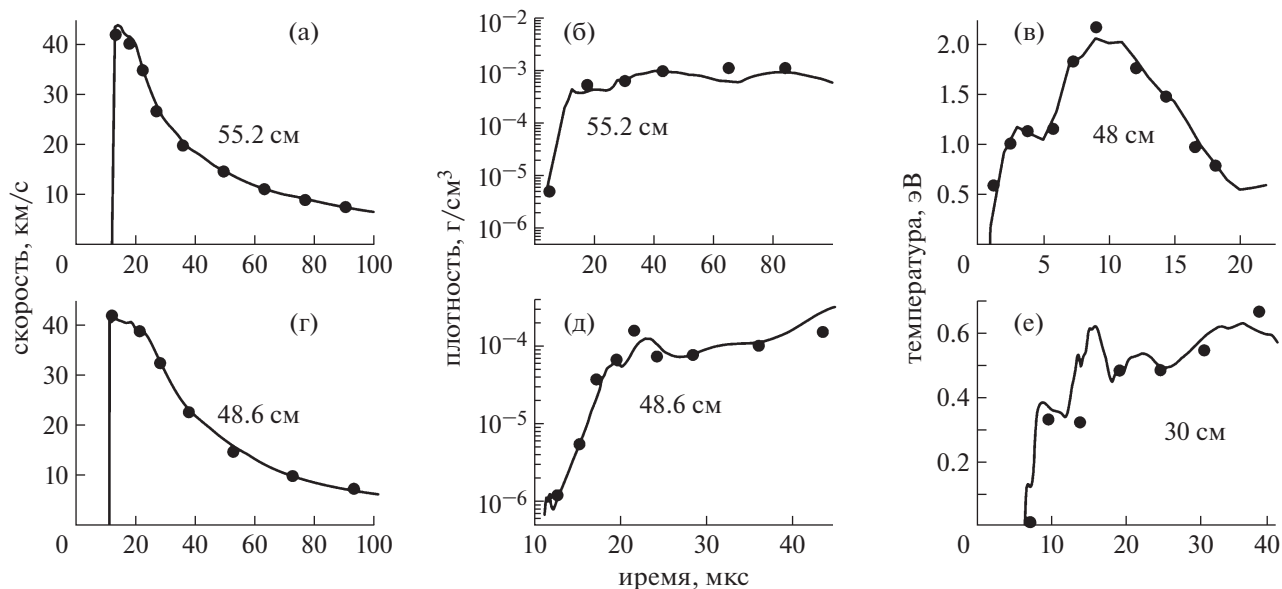


Рис. 2. Зависимости от времени скорости, плотности и температуры на различных расстояниях (приведены цифрами на рисунках) от выходного сечения сопла генератора ВГПС-400 (а–в) и ВГПС-300 (г–е). Сплошные кривые – результат численного моделирования, кружки – результаты измерений.

результате расчетов были получены величины длительностей инъекции (около 20 мкс), максимальной плотности и температуры плазмы (1 и 0.6 г/см^3 ; 4 и 3.2 эВ соответственно, для двух генераторов).

На рис. 2а–в представлено сравнение результатов численного моделирования динамики плазменной струи с данными измерений в наземном эксперименте с ВГПС-400, а на рис. 2г–е – с ВГПС-300. Сплошные кривые представляют зависимости от времени скорости, плотности и температуры на различных расстояниях от выход-

ного сечения сопла генератора (расстояния приведены на рисунках), кружки – результаты измерений. Сравнение демонстрирует хорошее совпадение с экспериментальными данными.

Численное моделирование начальной стадии динамики алюминиевой плазменной струи с использованием полученного сценария инъекции ВГПС-300 было проведено для высотного эксперимента “Флакрус” (высота 140 км , плотность окружающего воздуха $3 \times 10^{-12} \text{ г/см}^3$, давление $7.22 \times 10^{-3} \text{ дин/см}^2$, температура 799 К). На рис. 3 приведены зависимости от времени плотностей

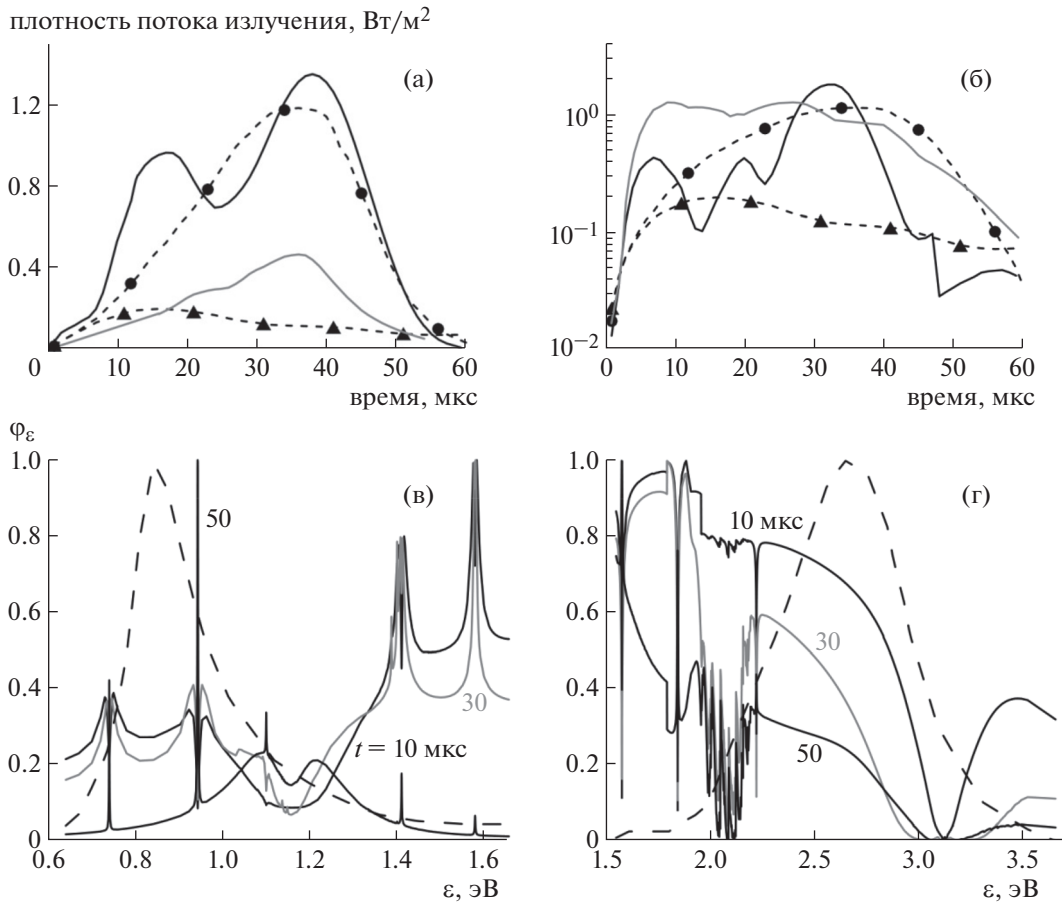


Рис. 3. Сравнение расчетных (сплошные кривые) и экспериментальных (штриховые кривые) кривых светимости на “красном” (черные кривые) и “синем” (серые кривые) фотодиодах: спектральный расчет (а), многогрупповой (б). Экспериментальные точки отмечены кружками для “синего” фотодиода, треугольниками – для “красного”. Спектры излучения (сплошные кривые) в различные моменты времени t и кривые пропускания фильтров (штриховые кривые) в диапазонах “красного” (в) и “синего” (г) фотодиодов.

потоков излучения, прошедшего через фильтры фотодиодов, расположенных на расстоянии 130 м от сопла генератора, рассчитанные двумя способами: с учетом спектрального состава излучения для всех энергий фотонов в диапазоне энергий фотонов фотодиодов (сплошные кривые, рис. 3а) и в групповом приближении, когда перенос излучения в данном диапазоне энергий квантов описывается не зависящем от энергий квантов средним, осредненным по планковской функции, коэффициентом поглощения (сплошные кривые, рис. 3б) и экспериментальные кривые (штриховые кривые). Здесь черные кривые соответствуют “синему” фотодиоду, серые – “красному”. Диапазон длин волн (энергий фотонов) “красного” фильтра – 0.74–1.95 мкм (1.66–0.64 эВ), “синего” фильтра – 0.33–0.8 мкм (3.67–1.55 эВ). Одновременные измерения излучения двумя различными фотодиодами увеличивают достоверность интерпретации результатов. Так как частота записи данных составляла величину 100 кГц, кружками и

треугольниками отмечены экспериментальные точки, соответствующие этой частоте. Как видно из рисунков, результаты расчетов с учетом спектрального состава излучения хорошо согласуются с данными измерений, а результаты расчетов в групповом приближении сильно отличаются от данных измерений. На рис. 3 для примера приведены также спектры излучения в диапазоне энергий фотонов “красного” (в) и “синего” (г) фотодиодов в различные моменты времени t . Здесь сплошные кривые – спектры, штриховые – спектральные коэффициенты пропускания фильтров. Спектры имеют сложный характер. Видно, что большая часть прошедшего через фильтры излучения соответствует крыльям чувствительности пропускания фильтров, поэтому решение с учетом спектральности излучения отличается от решения в групповом приближении – ярко выраженный спектральный эффект.

Отметим, что в рассматриваемой задаче характерное время обмена энергией между электрона-

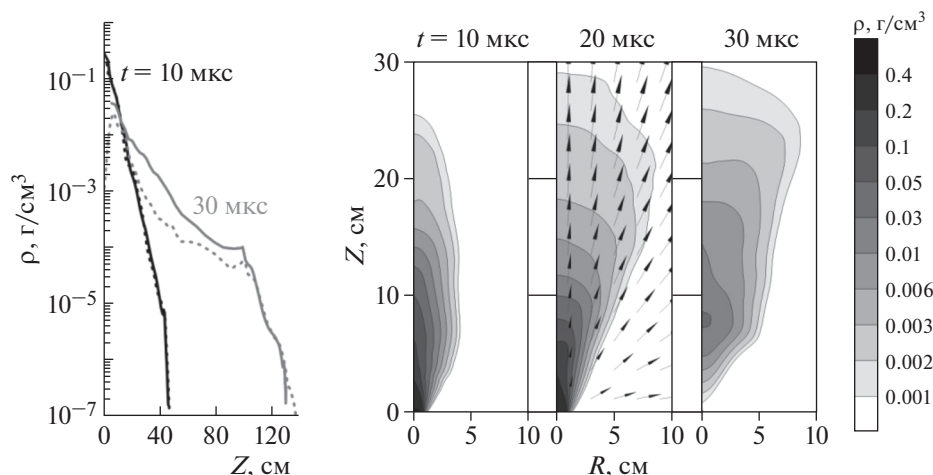


Рис. 4. Распределение вдоль оси струи плотности алюминиевых паров, полученное при численном моделировании в рамках сферически-симметричных уравнений (сплошные кривые) и двумерных (штриховые) уравнений газодинамики — левая часть рисунка. Пространственное распределение плотности в различные моменты времени и векторов скорости в момент времени 20 мкс — результаты двумерных расчетов.

ми и ионами при упругих соударениях и характерное время электрон-ионной рекомбинации при тройных столкновениях существенно меньше характерного времени изменения газодинамических параметров, что свидетельствует о правомерности приближения локального термодинамического равновесия.

Численное моделирование начальной стадии динамики алюминиевой плазменной струи с использованием полученного сценария инъекции ВГПС-400 было проведено для высотного эксперимента “Северная звезда-2” (высота 273 км, плотность окружающего воздуха 6×10^{-14} г/см³, давление 2.7×10^{-4} дин/см², температура 1400 К) как в рамках вышеописанной одномерной модели, так и в двумерном приближении (для проверки влияния бокового расширения). В двумерных расчетах (RZ геометрия) использовался многомерный код FRONT [8], основанный на явной схеме гудуновского типа на фиксированной эйлеровой сетке. В начальный момент времени область моделирования была заполнена идеальным газом (моделирующим воздух) с плотностью окружающей среды. При таких условиях истечение струи алюминия близко к режиму свободного разлета и не должно сопровождаться образованием ударной волны в воздухе. Однако численное моделирование такого истечения в гидродинамическом приближении (предполагающем малые длины свободного пробега частиц вещества) на эйлеровой сетке приводит к образованию ударной волны на границе алюминия и воздуха, сопровождающееся скачком плотности и нагреве вещества на ее фронте (численный эффект). В левой части рис. 4 приведено сравнение распределения плотности алюминиевой плазмы вдоль ра-

диуса, полученное в расчетах в одномерной постановке (сплошные кривые) и вдоль оси Z — в двумерной (штриховые кривые), показывающее хорошее согласие результатов, полученных в двух подходах к решению задачи. Из двумерного расчета видно, что струя сохраняет конусообразную форму на всем рассматриваемом промежутке времени, что говорит о корректности применения для описания начальной стадии движения плазменной струи одномерных сферически-симметричных уравнений газодинамики.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены зависимости от времени газодинамических параметров гиперзвуковой алюминиевой плазменной струи при ее инъекции из сопла взрывного кумулятивного генератора (ВГПС-300 и ВГПС-400) в разреженную среду на высоте 140 км в экспериментах “Флакрус” и на высоте 273 км в эксперименте “Северная звезда-2”.

Получены радиационно-газодинамические характеристики алюминиевой плазменной струи на начальной стадии ее динамики в атмосфере, определяющие дальнейшие процессы взаимодействия струи с окружающим воздухом. Проведенное сравнение зависимостей от времени расчетных плотностей потоков излучения показало хорошее согласие с данными измерений фотодиодами, расположенными на бортовом модуле в эксперименте “Флакрус”.

Разработанная модель позволила описать ту начальную газодинамическую стадию движения высокоскоростной плазменной струи, которая, вследствие малых времен, не могла быть измерена датчиками, использованными в эксперименте,

и которая формирует дальнейшее взаимодействие струи с ионосферой и геомагнитным полем.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FMWN-2022-0021. Работа Урвачева по 2D-моделированию поддержана грантом РФФ № 21-11-00362.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зецер Ю.И., Поклад Ю.В., Erlandson R.E.* // Физика Земли. 2021. № 5. С. 184.
<https://doi.org/10.31857/S0002333721050227>
2. *Losseva T.V., Golub' A.P., Kosarev I.B., Poklad Yu.V., Lyakhov A.N.* // Proc. SPIE 11916, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 119167O (15 December 2021);
<https://doi.org/10.1117/12.2603249>.
3. *Лосева Т.В., Голубь А.П., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И.* // Динамические процессы в геосферах. 2021. № 13. С. 175.
4. *Gatsonis N.A., DeMagistris M., Erlandson R.E.* // J. Spacecraft Rockets. 2004. V. 41. P. 509.
<https://doi.org/10.2514/1.11946>
5. *Косарев И.Б.* // Динамические процессы в геосферах. 2017. № 9. С. 110.
6. *Самарский А.А., Попов Ю.П.* Разностные методы решения задач газовой динамики. М.: Наука, 1992.
7. *Losseva T.V.* // Proc. SPIE 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 115608C (12 November 2020).
<https://doi.org/10.1117/12.2575441>.
8. *Глазырин С. И.* // Письма в Астрон. журн. 2013. Т. 39. С. 249.