

## АКТИВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ИОНОСФЕРЕ НА ВЫСОТАХ 140–360 КМ. РЕАНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2021 г. Ю. И. Зецер<sup>1, \*</sup>, Ю. В. Поклад<sup>1</sup>, R. E. Erlandson<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Baltimore, MD 21218 USA

\*E-mail: zetzer@idg.chph.ras.ru

Поступила в редакцию 28.02.2021 г.

После доработки 28.03.2021 г.

Принята к публикации 01.04.2021 г.

Движение плазменных образований, формирующих струйные и токовые системы в ионосфере, представляющей собой сложную и неоднородную среду, сопровождается возникновением ряда физических и геофизических эффектов. В их изучении большую роль играют активные эксперименты, в частности, с использованием высокоскоростных плазменных струй. Проведение таких экспериментов на разных высотах ионосферы дает возможность изучения и понимания динамики движения плазмы и сопутствующих явлений на различных временных и пространственных масштабах. К числу таких явлений можно отнести оптическое излучение в широком диапазоне длин волн, характеризующее газодинамические и физико-химические процессы взаимодействия. В результате проведенных ранее активных экспериментов в ионосфере “Флаккус” и “Северная звезда” было получено большое количество данных, которые обрабатываются и обсуждаются по настоящее время. В предлагаемой статье приведен реанализ части этих данных, полученных, в основном, оптическими приборами, размещенными на поверхности Земли, на спутнике и на борту геофизических ракет.

**Ключевые слова:** активный геофизический ракетный эксперимент, взаимодействие плазменной струи с разреженной ионосферой, химический взрыв в разреженной ионосфере, оптическое излучение газодинамических процессов.

**DOI:** 10.31857/S0002333721050227

### ВВЕДЕНИЕ

Активные эксперименты в космосе имеют богатую историю [Grandal, 1982; Krimigis et al., 1983; Haerendel et al., 1986; Winckler, 1992; Raitt, 1995; Unan, Rietveld, 1995; James et al., 1998; Inan et al., 2003; Dupont, 2004; Гохберг и др., 2004; Dyal, 2006; Haerendel, 2018; Pongratz, 2018; Prech et al., 2018; Ступицкий, 2019; Жмайло и др., 2019; Mishin, 2019; Winske et al., 2019; Borovsky et al., 2019]. Эти эксперименты включали в качестве воздействующих на ионосферу средств пучки электронов и ионов, выбросы плазмы и выбросы химических веществ.

На начальном этапе проведения активных экспериментов их стимулировали ядерные испытания в космосе, проведенные в начале шестидесятых годов. Такие физические и геофизические эффекты, возникающие при взрывах, как рост ионизации, образование и схлопывание диамагнитной полости, генерация электромагнитных импульсов, распространение стимулированных электромагнитных волн, атмосферные возмуще-

ния, движения и захват энергичных частиц — не были до конца понятны и требовали прояснения и разработки моделей [Pongratz et al., 2018]. По мере развития и осмысливания результатов активных экспериментов стало понятно, что распространение плотной плазмы через магнитное поле представляет собой тему, имеющую большой интерес и для более широкого круга дисциплин в физике плазмы, в частности, к солнечным, ионосферным, магнитосферным и астрофизическим явлениям.

Основные научные задачи исследований были сформулированы еще на начальном этапе активных экспериментов [Haerendel, 1981]. Однако возможности решения этих задач определялись уровнем развития ракетных и спутниковых технологий, а также уровнем методов и приборов измерений. И если первые эксперименты, в основном, были направлены на понимание того, “как явление происходит”, то последующие, в том числе современные, ставят задачу понимания механизмов происходящего. Постоянно совер-

шенствующая диагностика, появление новых технологий воздействия на среду (компактные, релятивистские электронные пучки, высокоскоростные плазменные струи, антенны нового поколения, микроспутники и т.д.) способствовали формированию современных тем и интересов.

На семинаре “Активные эксперименты в космосе: прошлое, настоящее и будущее” в Санта-Фе в 2017 г. были представлены концепции будущих космических активных экспериментов, предназначенных для исследований, это: (1) начало магнитного пересоединения, (2) инициирование суббурь активными экспериментами, (3) приток массы в область бесстолкновительного пересоединения, (4) физика критических скоростей ионизации, (5) распространение Альфвеновской волны из одного полушария в другое, (6) явления в сопряженных точках для перемещающихся ионосферных неоднородностей и (7) магнитосферно-ионосферных связей [Delzanno et al., 2020].

В методическом плане современные исследования околоземной космической среды с использованием зондирующих ракет обеспечиваются все более изощренными и сложными наборами изучения ионосферы и мезосферы и, в частности, определения механизмов протекающих явлений [Ganguli et al., 2015; Lynch, 2020; Hassanali et al., 2020; Santos-Costa, 2020]. Это мультинагрузочные и мультиплатформенные активные эксперименты, в которых сочетаются наблюдения *in-situ* с наземными наблюдениями и численным моделированием.

Развивающиеся в последнее время лабораторные эксперименты также являются ценным методом изучения фундаментальной физики ионосферной плазмы. В лабораторных экспериментах отсутствуют ограничения, присущие космическим экспериментам, заключающиеся в измерениях только в одной (или нескольких) точках в космосе. Эти эксперименты позволяют использовать большее количество измерительных методов, т.е. лучше контролировать как состояние плазмы, так и прикладываемые возмущения, могут быть неоднократно воспроизводимыми и являются более дешевыми, чем запуск зондирующей ракеты или спутника [Remington et al., 2000; Захаров и др., 2016; Тищенко и др., 2016; Howes, 2018; Гушин и др., 2018; Starodubtsev et al., 2019].

Однако следует отметить, что лабораторные эксперименты не могут заменить эксперименты в натурной среде. Ионосферные и магнитосферные эксперименты могут единственным образом решить задачи крупномасштабной плазмы и дальнедействующего взаимодействия, а также в наибольшей степени бесстолкновительных физических процессов. Кроме того, лабораторные эксперименты работают в масштабах, плотностях

плазмы, температур и столкновений, которые могут сильно отличаться от таковых в реальной среде. Поэтому лабораторные эксперименты с правильно подобранными критериями моделирования можно проводить, только исследуя ограниченный набор физических и геофизических явлений.

В настоящей статье обсуждаются результаты реанализа экспериментальных исследований, полученных, в основном, оптическими приборами, посвященных проблемам динамики высокоскоростных плазменных струй в ионосфере на высотах 140–360 км.

Возможности взрывных генераторов, в сочетании с возможностями использованных геофизических ракет, способных вывести полезную нагрузку большой массы, широкий совокупный диапазон измерений наземной, бортовой и спутниковой аппаратуры, позволили проследить цепочку процессов: динамика собственно плазменной струи  $\Rightarrow$  газодинамические, электродинамические и магнитогидродинамические явления ее взаимодействия с окружающей средой  $\Rightarrow$  реакция окружающей среды на оказываемое воздействие, в относительно больших временном и пространственном диапазонах.

## СЦЕНАРИИ, ВНЕШНИЕ УСЛОВИЯ И АППАРАТУРА АКТИВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### Эксперименты “Флаккус”

Две однотипных инъекции в эксперименте “Флаккус” (*Fluxus*) проводились на средней широте на полигоне Капустин Яр (48.5817° с.ш., 45.7448° в.д.). Они выполнялись ночью, чтобы исключить влияние солнечного излучения на процесс взаимодействия. Всего было выполнено две инъекции: F1-1 и F1-2: 31.01.1997 г. в 01h57'48" UT и 05.02.1997 г. в 02h18'47" UT соответственно [Адушкин и др., 1993; Erlandson et al., 1999].

Постановка обоих экспериментов была одинаковой. Геофизическая ракета МР-12 стартовала под углом около  $\sim 70^\circ$  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  $\sim 130$  м от измерительного модуля ракеты, происходила детонация взрывчатого вещества (ВВ) плазменного генератора с образованием струи плазмы, которая инжектировалась примерно вдоль местного геомагнитного поля в направлении модуля с бортовой научной аппаратурой. Кроме бортовой, часть аппаратуры наблюдения располагалась на поверхности Земли и на спутнике.

Основная часть оптической аппаратуры размещалась на спутнике MSX [Paxton et al., 1996]. Расстояния от спутника до области инъекции

струи для Fl-1 и Fl-2 составляли, соответственно, 3150 и 3100 км. Кроме того, оптические наблюдения осуществлялись с использованием фотометров и видеокамер, расположенных на поверхности Земли в районе пусковой площадки.

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”

Эксперименты “Северная звезда” (*North Star*) проводились в высоких широтах на Аляске. С полигона Chatanika ( $65.1253^\circ$  с.ш.,  $147.4880^\circ$  з.д.) 22.01.1999 г в 13:58:03 UT с помощью геофизической ракеты Black Brant XII была запущена полезная нагрузка, которая после разведения представляла собой четыре научных модуля [Erlandson et al., 2002].

Эти модули выводились в собранном виде в заданную точку траектории, затем разворачивались таким образом, чтобы ось инжектируемых струй была перпендикулярна местному геомагнитному полю. После этого производилось разделение полезной нагрузки до заданного баллистического порядка и в соответствии с временной программой осуществлялись инъекции плазмы.

На первом модуле (ETG-1) был установлен взрывной генератор плазменной струи (ВГПС-400) для первой инъекции. На втором (ETG-2) — кроме аналогичного генератора ВГПС для второй инъекции, были установлены датчики, регистрирующие параметры струи при первой инъекции. Остальные два модуля — PDP и OSP были оснащены специализированной аппаратурой: модуль PDP (Plasma Diagnostic Payload) — аппаратурой для плазменных измерений, модуль OSP (Optical Space Payload) — специализированной высокоскоростной оптической аппаратурой. Этот модуль был стабилизирован в пространстве [Erlandson et al., 2004].

Две инъекции высокоскоростной плазменной струи (NS-1 и NS-2) были выполнены с интервалом времени  $\sim 155$  с на одной траектории. Непосредственно до первой инъекции перед генератором плазменной струи было выпущено 12 г сухого воздуха для исследования роли нейтральной атмосферы на ионизацию струи и сопоставления с результатами экспериментов “Флаккус”.

Расстояния модулей от генераторов плазменной струи в первой инъекции составляли: ETG-2 — 170 м, PDP — 468 м, OSP — 1020 м, а при второй инъекции: PDP — 537 м и OSP — 1595 м. Кроме того, при второй инъекции, вследствие прецессии, продольная ось модуля PDP составляла  $\sim 60^\circ$

с осью плазменной струи. Обе инъекции в экспериментах “Северная звезда” были с точностью до  $10^\circ$  направлены перпендикулярно местному геомагнитному полю.

Кроме бортовой аппаратуры, размещенной на модулях, в экспериментах принимала участие оптическая аппаратура упомянутого выше спутника MSX, а также часть оптических наблюдений осуществлялась с использованием высокоскоростных видеокамер, фотометров и спектрографов, расположенных в наземных пунктах Poker Flat и Kaktovic. Состав аппаратуры описан в работе [Erlandson et al., 2004].

Пуск ракеты Black Brant XII состоялся через несколько минут после начала авроральной активности и полет происходил во время обширного проявления аврорального сияния. Ракета пересекла авроральную дугу на восходящей части траектории до момента проведения инъекций струи. Оптическое излучение аврорального сияния практически не мешало наблюдениям спектров струи во время инъекций: модуль OSP имел угол зрения  $18^\circ$ , и его объективы были направлены в противоположную сторону от развивающейся Авроры; при регистрации с MSX интенсивность эмиссий при обеих инъекциях была существенно выше интенсивности авроральных линий.

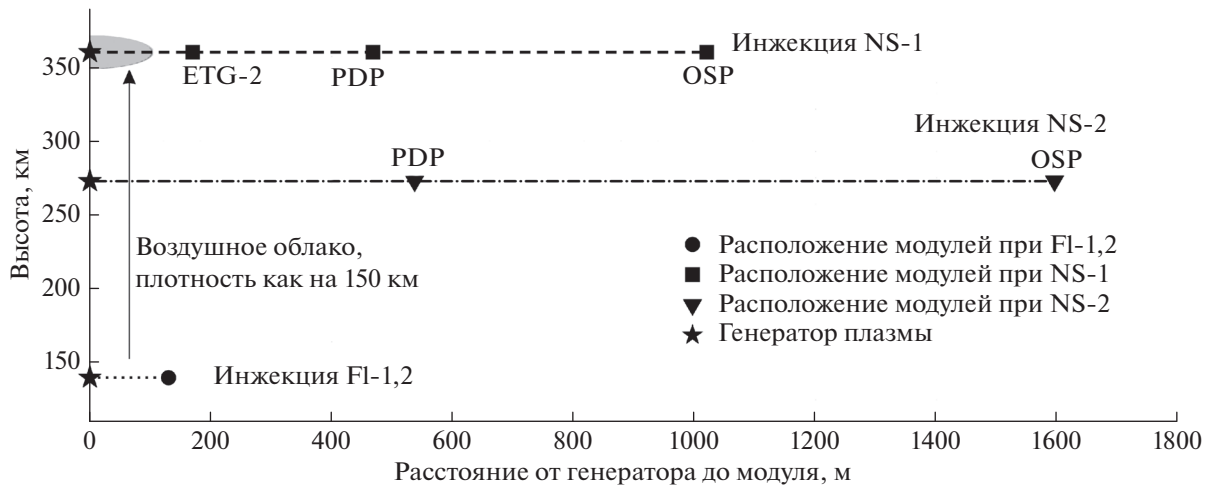
На рис. 1 показано расположение модулей с измерительной аппаратурой относительно плазменных генераторов.

### Взрывные генераторы плазменной струи (ВГПС)

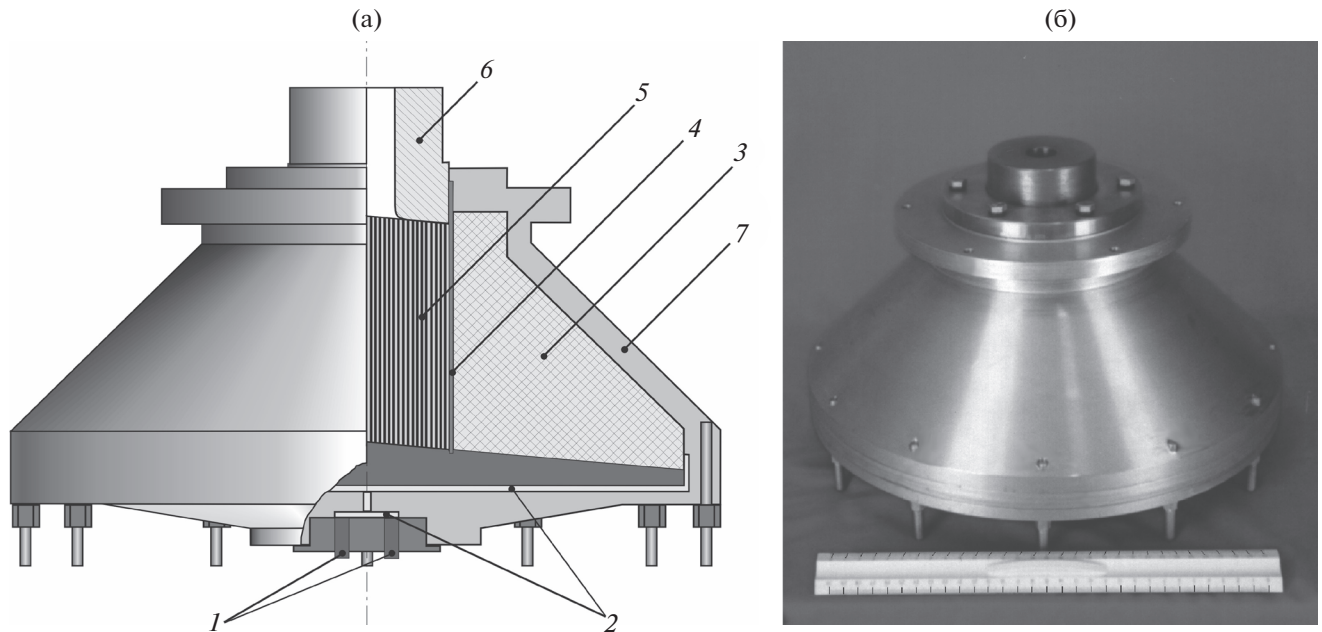
В экспериментах использовались взрывные генераторы: ВГПС-300 — в экспериментах “Флаккус”, и ВГПС-400 — в экспериментах “Северная звезда” [Адушкин и др., 2000]. Оба генератора были идентичны по конструкции, но отличались по габаритам вследствие различных размеров головных частей геофизических ракет, а также по массе струи и весу ВВ: 15 г и 4.5 кг для ВГПС-300 и 30 г и 9 кг — для ВГПС-400.

ВГПС инжектировал плазменную струю алюминия с высокой плотностью ионов со скоростями ионов от 42 км/с (передний фронт) и до 7 км/с (задний фронт). Учитывая быструю рекомбинацию ионов алюминия, в составе распространяющейся струи присутствовал и нейтральный алюминий. Время выхода струи из корпуса генератора составляло  $\sim 20$  мкс. Наземные испытания ВГПС показали, что  $\sim 90\%$  массы плазменной струи сосредоточено в пределах телесного угла  $\pm 10^\circ$  от оси струи.

Заряд ВВ указанных генераторов состоял из смеси двух взрывчатых веществ (ТНТ и гексаген). Энергия взрывчатки составляла  $\sim 20$  МДж (ВГПС-300) и  $\sim 40$  МДж (ВГПС-400).



**Рис. 1.** Расположение модулей с измерительной аппаратурой относительно плазменных генераторов. При инъекции NS-1 за счет предварительного впрыска сухого воздуха начальный разлет струи соответствовал разлету на высоте 150 км, но после модуля ETG-2 окружающая ионосфера соответствовала истинной высоте – 360 км.

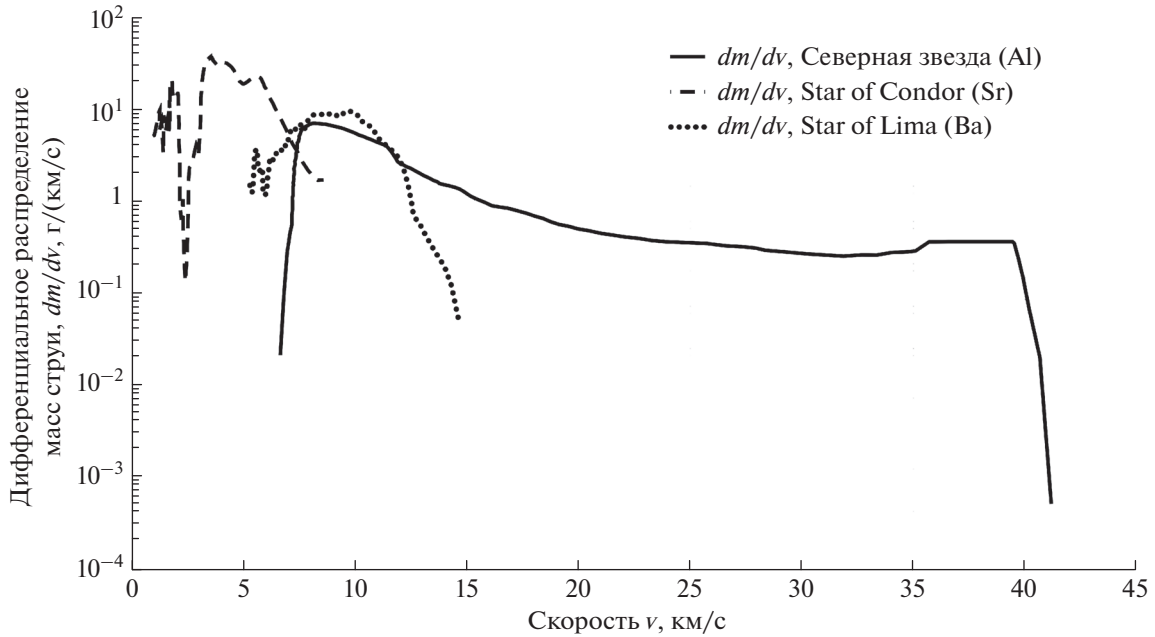


**Рис. 2.** (а) – Конструкция генераторов ВГПС: 1 – детонаторы; 2 – листовое ВВ; 3 – основное ВВ; 4 – внешний слой плазмообразующего алюминия; 5 – тонкие трубки плазмообразующего алюминия; 6 – выходное сопло; 7 – корпус генератора; (б) – внешний вид генератора ВГПС-400.

Схема и внешний вид генераторов приведены на рис. 2. Продукты взрыва кумулятивного ВВ отсекались от алюминиевой плазменной струи специальной конструкцией выходного сопла. Чисто алюминиевый состав струи был подтвержден как в наземных испытаниях, так и во время проведения экспериментов “Флакрус” с использованием спектральных наблюдений со спутника MSX в спектральном диапазоне от 110 до 900 нм. Осколки, возникающие в результате разрушения кор-

пуса генератора, расширились медленнее, чем плазменная струя, и, таким образом, не мешали наблюдениям эффектов взаимодействия плазменной струи с ионосферой.

Для выпуска сухого воздуха перед первой инъекцией на генераторе был установлен специальный баллон со сжатым воздухом. Параметры инжектируемых струй плазменных генераторов определялись в наземных экспериментах с ис-



**Рис. 3.** Дифференциальное распределение масс ионов алюминия по скоростям для генератора ВГПС-400, использованного в эксперименте “Северная звезда”. Для сравнения на этом же графике приведены дифференциальные распределения масс атомов стронция (Sr) и бария (Ba) для взрывных генераторов, использованных в экспериментах Star of Condor и Star of Lima.

пользованием вакуумной камеры при давлении  $\sim 10^{-3}$  мм рт. ст.

На рис. 3 представлено дифференциальное распределение масс ионов алюминия по скоростям для генераторов, использованных в указанных выше экспериментах. Для сравнения на этом же графике приведены дифференциальные распределения масс атомов стронция (Sr) и бария (Ba) для взрывных генераторов, использованных в экспериментах Star of Condor [Wescott et al., 1986] и Star of Lima [Wescott et al., 1986].

На рис. 4 представлены яркостные температуры плазменной струи генераторов ВГПС-300 и ВГПС-400, измеренные в вакуумной камере сборки на расстояниях 90 и 250 мм от сопла (выходной втулки) генератора, а также в направлении в торец струи. Измерения проводились в узких телес-

ных углах, с помощью фотодиодов, стоящих за фильтрами с эффективной длиной волны 435 и полушириной 20 нм.

В табл. 1 представлены основные параметры генераторов ВГПС-300 и ВГПС-400, использованных в экспериментах “Флаккус” и “Северная звезда”.

### ДИНАМИКА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ПРИ ЕЕ РАЗЛЕТЕ В РАЗРЕЖЕННУЮ ИОНОСФЕРУ

#### Начальная стадия и распределение концентрации ионов

В экспериментах “Флаккус” на модуле, находящемся на расстоянии 130 м от плазменного генератора, были установлены фотодиоды, реги-

**Таблица 1.** Основные данные ВГПС, использованных в программах “Флаккус” и “Северная звезда”

Параметры генератора	Эксперименты “Флаккус”, инъекции FI-1.2	Эксперименты “Северная звезда”	
		инъекция NS-1	инъекция NS-2
Масса ВВ, кг	4.5	9	9
Масса инжектируемой струи, г	15	30	30
Масса предварительно выпущенного воздуха, г	—	12	—
Полная энергия струи, МДж	3	6	6
Максимальная начальная яркостная температура плазмы, К/эВ	16000/1.4	25000/2.2	25000/2.2
Скорости плазменной струи, км/с	42 (передний фронт)—7 (задний фронт)		

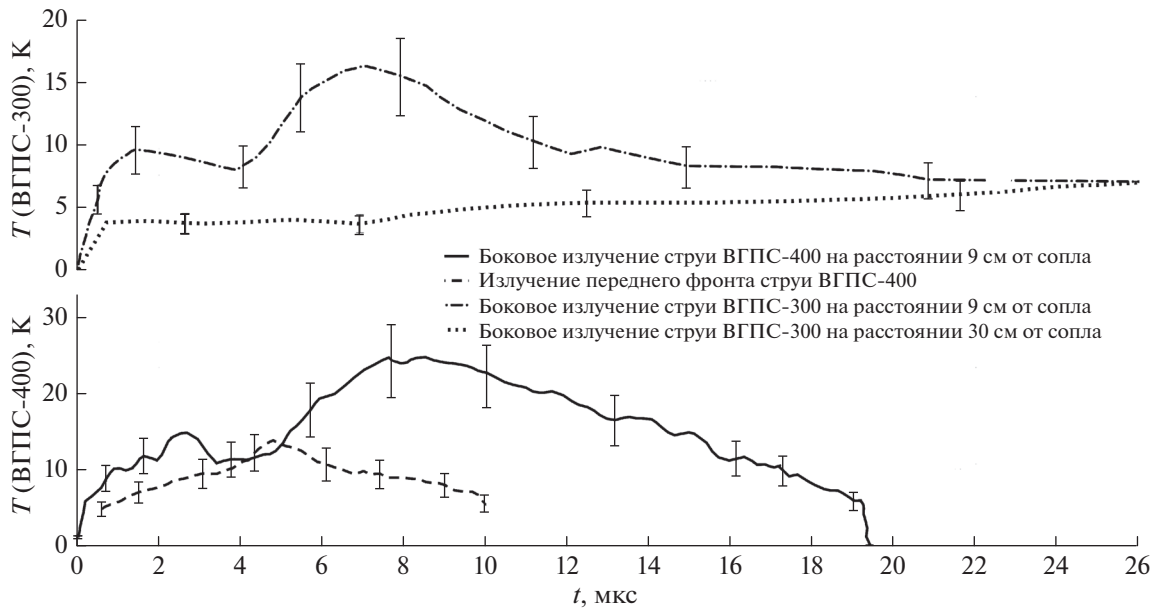


Рис. 4. Яркостные температуры плазменной струи генераторов ВГПС-300 и ВГПС-400, измеренные в вакуумной камере сбоку на расстояниях 90 и 250 мм от сопла генератора, а также в направлении в торец струи.

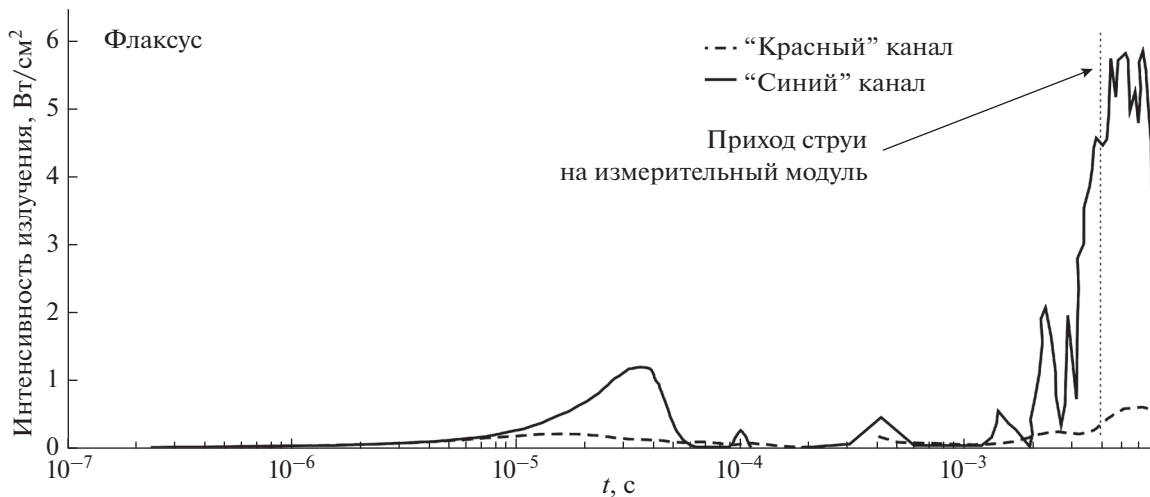


Рис. 5. Сигналы с фотодиодов при первой и второй инъекциях для спектральных каналов 400–550 нм и 1.3–1.6 мкм.

стрирующие плотность потока энергии излучения от плазменной струи. Фотодиоды имели два фильтра: один с полосой пропускания 0.4–0.55 микрон, названный “синим” каналом, другой – с полосой пропускания 1.3–1.6 микрон, названный “красным” каналом. Ввиду большого быстродействия, удалось получить самую первую информацию об излучении струи (рис. 5)

Анализируя приведенные данные, можем отметить, что основная доля высвечиваемой энергии приходится на коротковолновый (“синий”) канал, что свидетельствует о высокой температуре начальной стадии. Кроме того, вызывает интерес

первоначальный импульс на ~30 мкс. Возможно, этот импульс вызывается “просветлением”, т.е. ситуацией, когда передний фронт расширяющейся струи охлаждается настолько, что регистрируется температура области этой струи, расположенной за фронтом.

#### Распределение концентрации ионов и нейтралов

На каждом из измерительных модулей в проведенных экспериментах “Флакрус” и “Северная звезда” были расположены Ленгмюровские зонды, что дало возможность проследить изменение

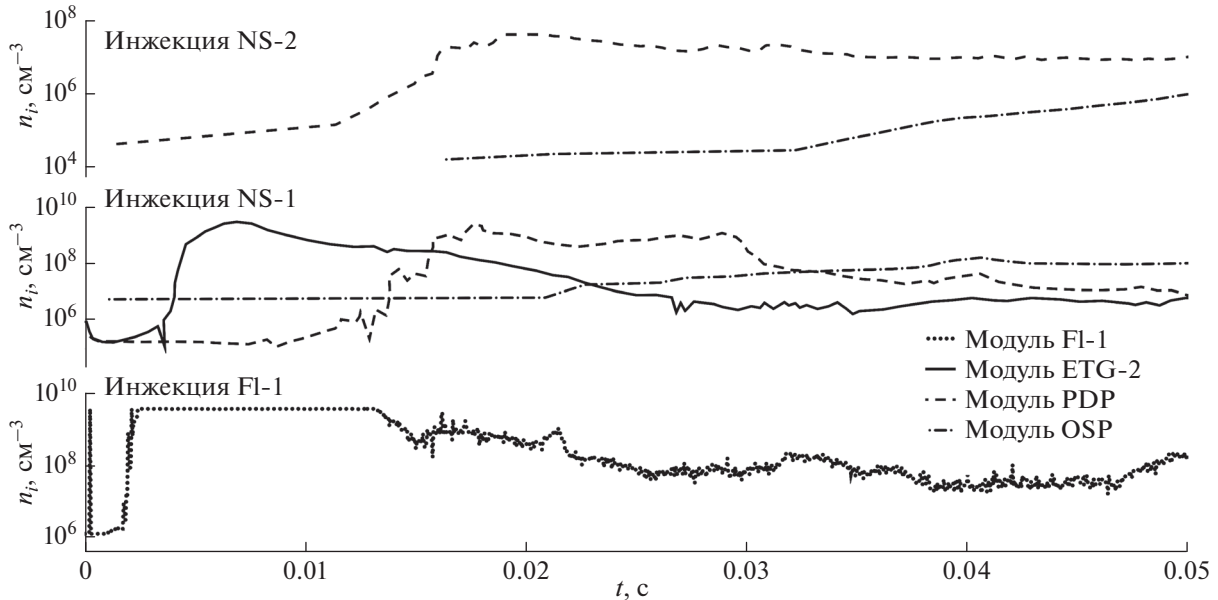


Рис. 6. Распределения концентраций плазменной струи около каждого из модулей в инъекциях экспериментов “Флакрус” и “Северная звезда”.

концентрации ионов в плазме струи на расстоянии до  $\sim 1.5$  км. На рис. 6 показаны распределения этих концентраций около каждого из модулей при каждой инъекции.

В эксперименте “Флакрус” в измерительном модуле был установлен пироприемник, способный измерять кинетическую энергию налетающей струи. Пользуясь этими данными в сочетании с измерениями концентрации ионов и в предположении, что вся поступающая на пироприемник энергия определяется кинетической энергией частиц алюминия, можно оценить как общую концентрацию частиц (нейтралов и ионов) в движущейся струе, так и отдельно плотность нейтральных частиц.

На рис. 7 представлены измеренные концентрации ионов (с использованием интерполяции на участке насыщения зонда Ленгмюра) и нейтралов. Судя по графику, на фронте струи концентрация ионов по порядку величины равна общему числу налетающих частиц. Начиная с  $\sim 10$  мс, заряженная компонента струи уменьшается, и последующая плотность потока кинетической энергии налетающей струи, регистрируемая пиродатчиком, определяется, практически, движением нейтралов.

Распределение концентрации ионов в струе по линии расположения измерительных модулей свидетельствует о довольно слабом газодинамическом торможении окружающей средой. На рис. 8 построен график зависимости максимальных величин концентраций ионов для каждой из инъекций от расстояния до модулей.

Как видно, интерполяционная кривая  $\sim L^{-3.3}$ . Если считать, что расширяющаяся струя имеет вид конуса с постоянным углом при вершине  $20^\circ$ , то плотность газа в объеме этого конуса также  $\sim L^{-3}$ . Т.е. изменение плотности ионов с точностью до  $L^{0.3}$  определяется увеличением объема струи.

#### Внешняя картина разлета струи в УФ, видимом и ИК диапазонах

Внешняя картина разлета струи и ее взаимодействия с ионосферой была получена в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах приборами спутникового и наземного базирования.

*Изображения в ультрафиолетовом диапазоне.* На рис. 9а показаны изображения внешнего вида области взаимодействия для инъекций FI-2, NS-1 и NS-2 в УФ диапазоне (180–300 нм), а на рис. 9б аналогичные изображения в видимом диапазоне (300–900 нм). Время измерения – 0–0.5 с после начала инъекций.

Как видно, изображения внутренней области расширения струи в первые 0.5 с после инъекции (рис. 9), к сожалению, не разрешимы из-за насыщения. Тем не менее сравнения показывают, что наибольший размер излучающей области (около  $10 \text{ км}^2$ ) приходится на ультрафиолетовый диапазон при инъекции NS-1. Можно также построить интегральную по пятну интенсивность излучения (рис. 10) [APL Report, 2000], откуда видно, что радиационная энергия этой плазменной области в УФ диапазоне составляет десятки килоджоулей за 0.5 с.

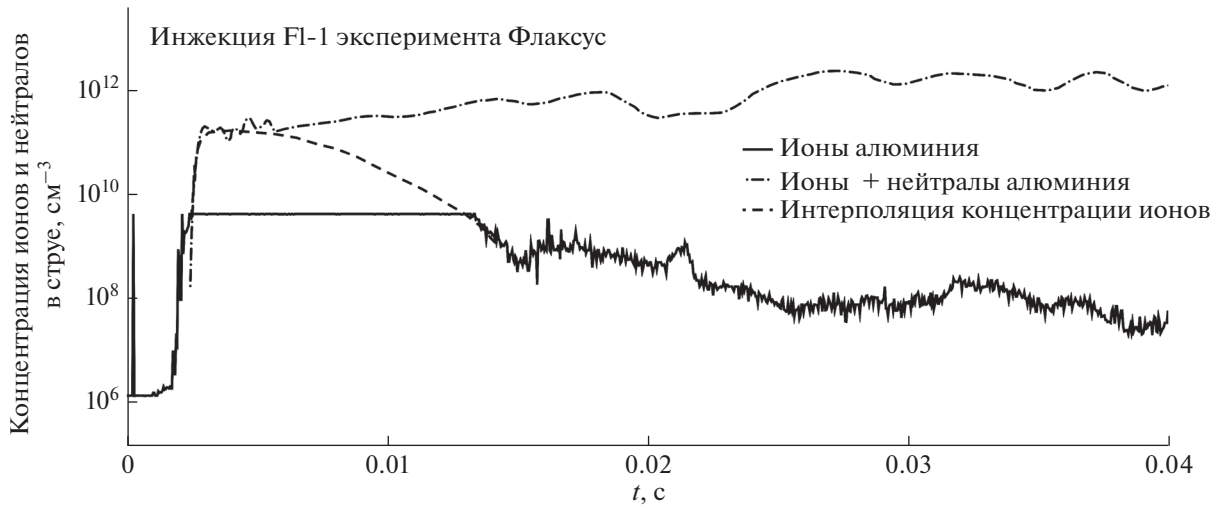


Рис. 7. Сравнение концентраций ионов и суммарной (ионов и нейтралов) в движущейся струе.

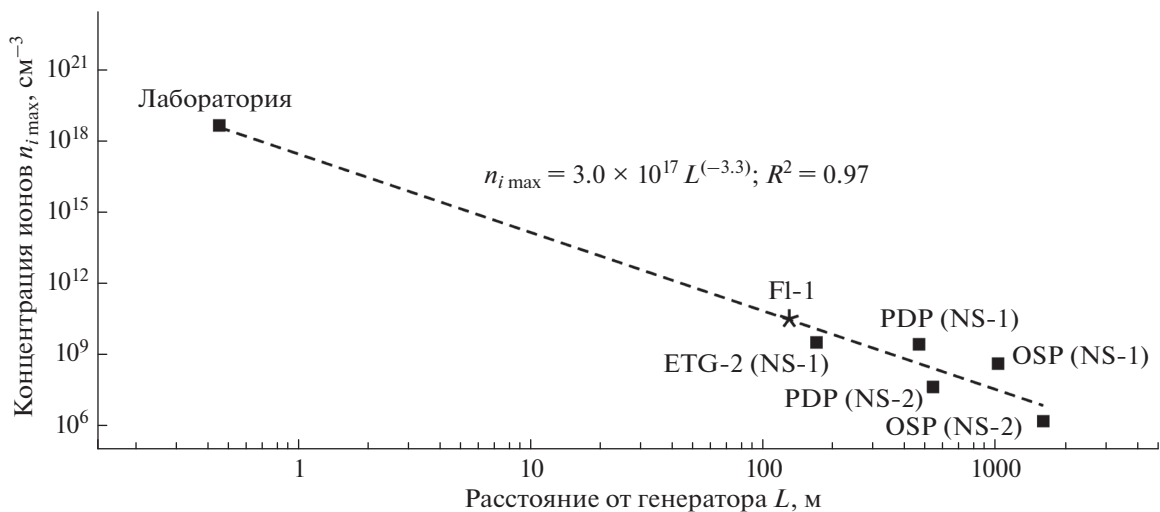


Рис. 8. Максимальные величины концентраций ионов около соответствующих модулей для каждой из инъекций.

Отметим также, что на среднем изображении рис. 9а отчетливо видны мелкомасштабные неоднородности, видимо, являющиеся поздней стадией формирования плазменных неустойчивостей.

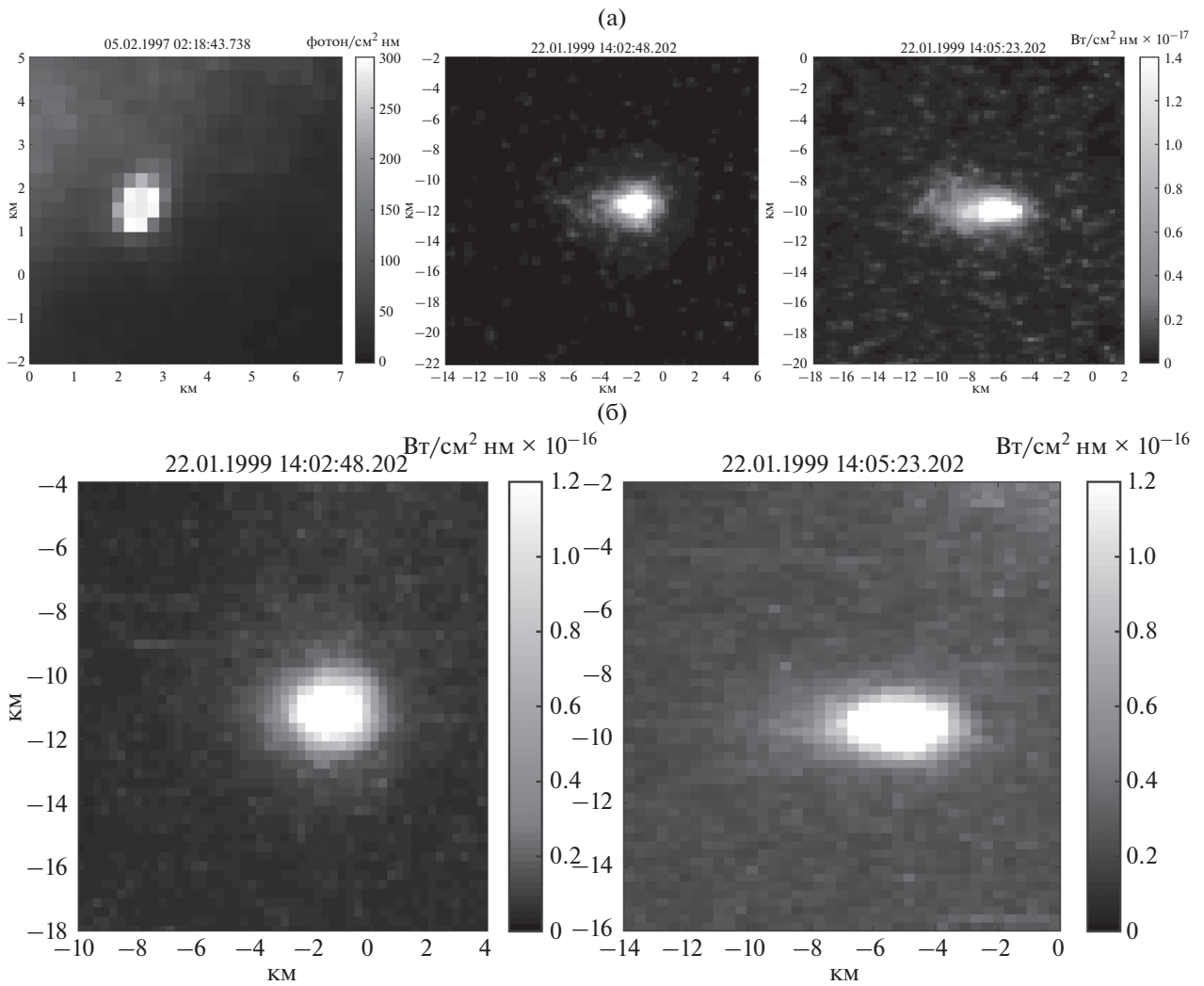
*Изображения в видимом диапазоне.* На рис. 11 представлены изображения плазменной струи при первой инъекции, полученные из наземного пункта Roker Flat с помощью ТВ камеры с узким полем зрения за период времени 0.017–0.75 с после начала первой инъекции (NS-1).

На рис. 12 представлены изображения плазменной струи при второй инъекции (NS-2), полученные этой же камерой за период времени 0.017–0.6 с после начала инъекции.

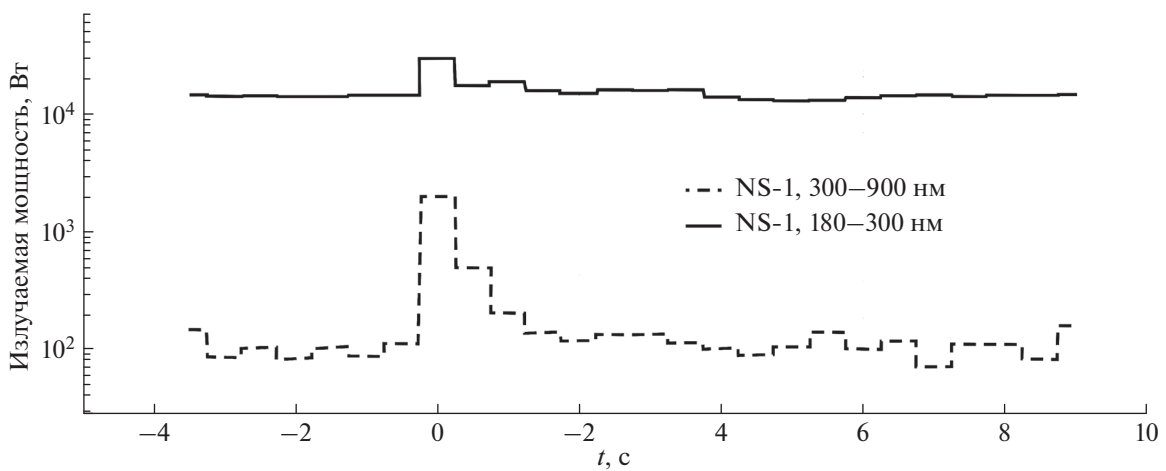
На этих рисунках инъекция плазменной струи направлена вправо (тонкие линии на рис. 11 и рис. 12, длина которых составляет ~5 км). Эти линии перпендикулярны вектору геомагнитной индукции ( $\pm 10^\circ$ ) [Erlandson et al., 2004].

Изображения в видимом диапазоне струи при инъекции NS-1 резко отличаются от изображения при второй инъекции NS-2 (рис. 11 и рис. 12). Если при первой инъекции изображение формируется относительно симметрично, то при второй инъекции изображение развивается первоначально вдоль направления геомагнитного поля (перпендикулярно направлению инъекции), а затем “поворачивается” и развивается вдоль направления инъекции. Пока объяснение этих фактов у нас отсутствует.

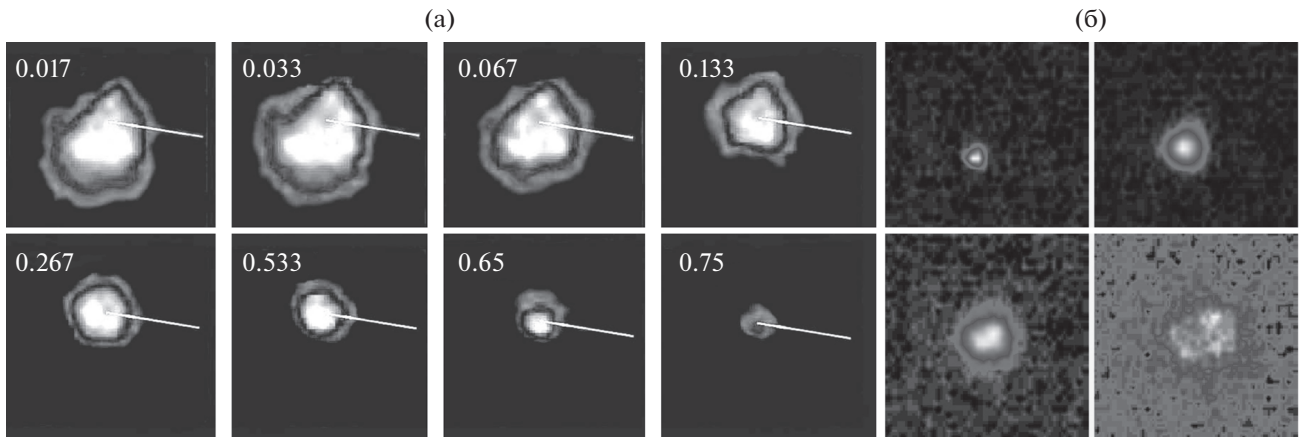




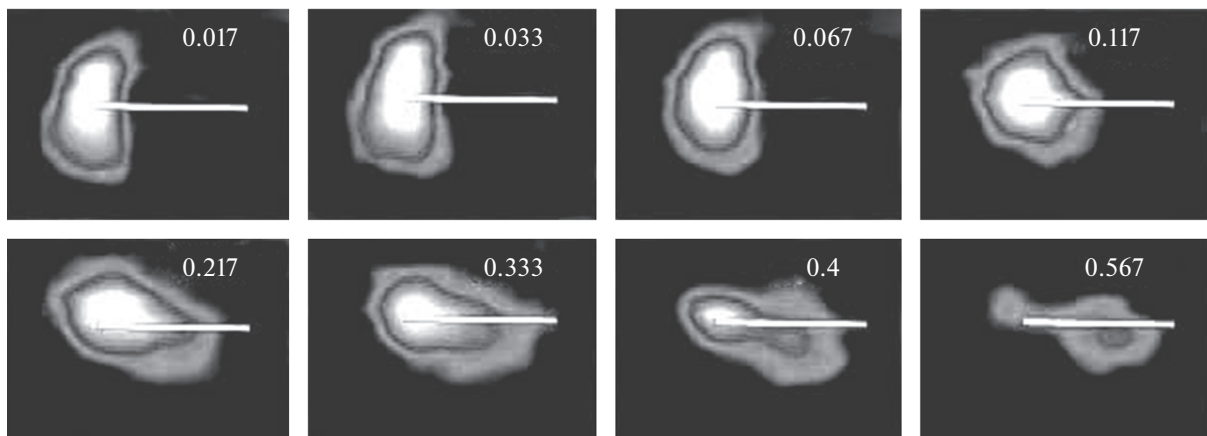
**Рис. 9.** Изображения области взаимодействия плазменной струи с окружающей ионосферой, полученные приборами спутника MSX в течение первых 0.5 с после соответствующих инъекций: в диапазоне 180–300 нм (а) и 300–900 нм (б).



**Рис. 10.** Интегральная по пятну интенсивность излучения областей взаимодействия в УФ (180–300 нм) и видимом (300–900 нм) диапазонах при инъекции NS-1.



**Рис. 11.** Изображения плазменной струи при первой инъекции, полученные из Poker Flat с помощью ТВ камеры с узким полем зрения (SIT) за период времени 0.017–0.8 с после начала инъекции.



**Рис. 12.** Изображения плазменной струи при второй инъекции, полученные из Poker Flat с помощью ТВ камеры с узким полем зрения (SIT) за период времени 0.017–0.6 с после начала инъекции.

Кроме того, на рис. 11б, так же, как и на рис. 9а, наблюдаются оторвавшиеся от струи мелкомасштабные неоднородности, видимо, являющиеся поздней стадией формирования плазменных неустойчивостей.

*Изображения в ИК диапазоне.* На рис. 13 показаны кадры съемки процесса инъекции, полученные телескопом SPIRIT III в разные моменты времени в полосе 6–10.9 микрон.

Наблюдается светящееся (в ИК диапазоне) образование, перемещающееся медленнее, чем первичная плазменная струя, и в течение более длительного времени. Эти ИК изображения имеют скорее отношение к движению плазмы, смешанной с продуктами взрыва и испаренными деталями корпуса генератора.

На рис. 14 показан отдельный кадр распределения излучаемой энергии корпуса геофизической ракеты и облака, полученных в полосе 13.5–

15.9 микрон, при  $t = 7.6$  с, когда ракета и облако находились отдельно друг от друга.

На рис. 15 показана энергетическая светимость облака в ИК спектральных диапазонах. Приведенный рисунок свидетельствует о большой длительности светимости облака, которая происходит в ИК диапазоне, т.е. при существенно меньших температурах, что представляет основное отличие регистрируемого облака от плазменной струи.

### Данные спектрографических измерений

Пониманию того, какие физические процессы происходят при движении плазменной струи в ионосфере, могут способствовать спектрографические измерения. Эти измерения осуществлялись, как быстродействующими (временное разрешение 3 мс) бортовыми приборами, установ-

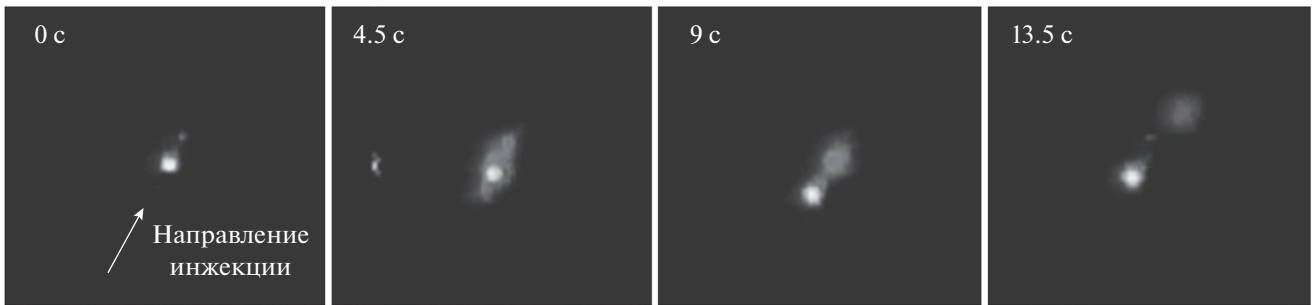


Рис. 13. Кадры съемки процесса инъекции, полученные телескопом SPIRIT III в разные моменты времени. Яркое пятно – это головной отсек геофизической ракеты.

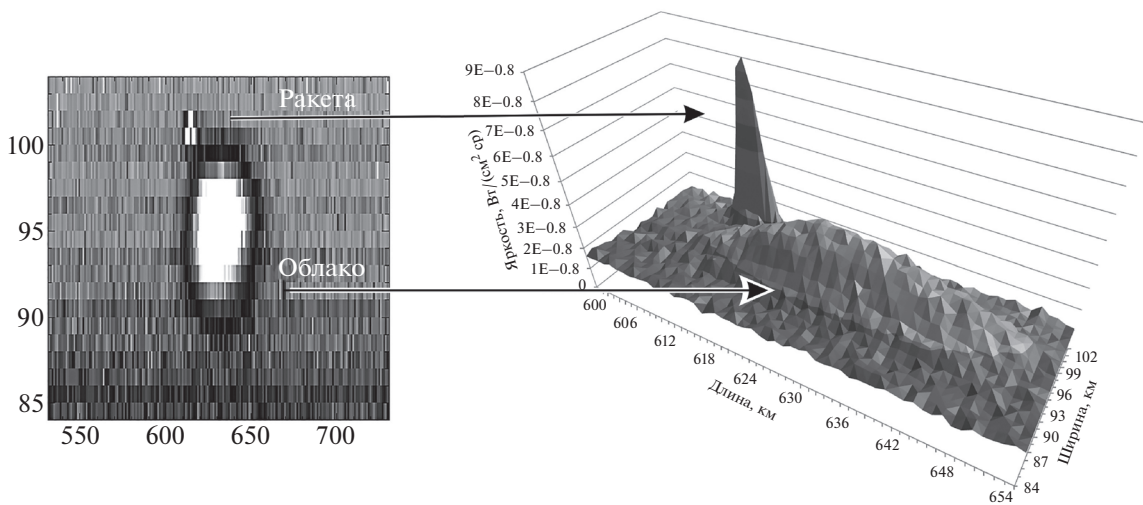


Рис. 14. Энергия, излучаемая ракетой и облаком, полученная в полосе 13.5–15.9 микрон, при  $t = 7.6$  с, когда ракета и облако находятся отдельно друг от друга.

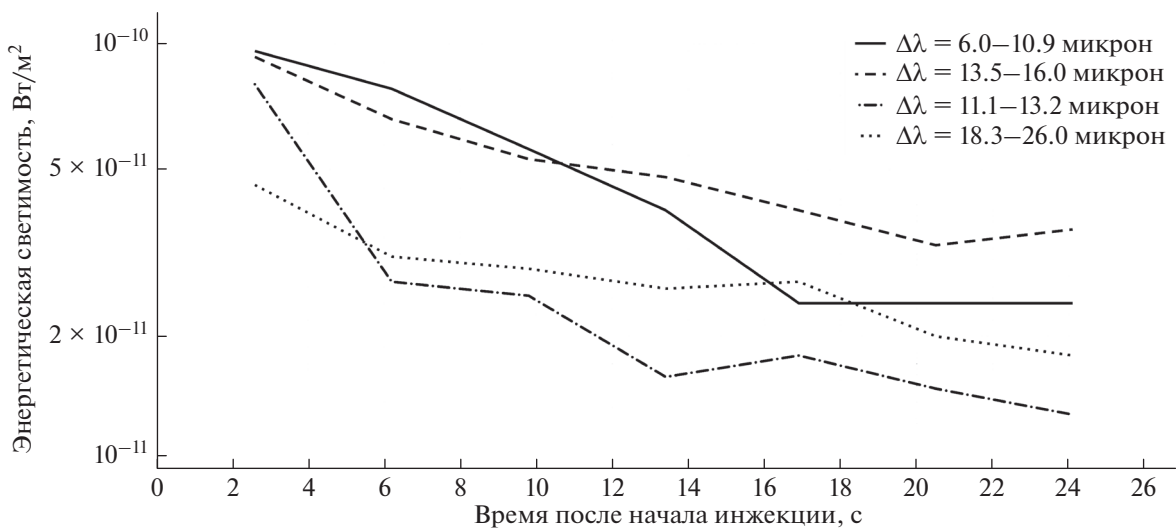
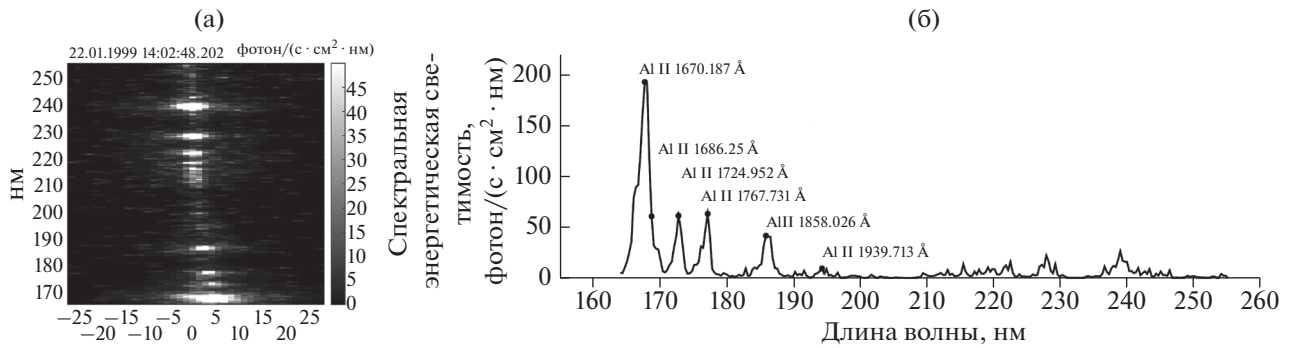


Рис. 15. Энергетическая светимость облака в ИК диапазонах от 6 до 26 микрон.



**Рис. 16.** Участок спектрографического изображения области взаимодействия, наблюдаемого только при инъекции NS-1 (а), и спектр по указанному сечению изображения (б).

ленными на модуле OSP, так и спектрографами, размещенными на спутнике MSX с временным разрешением 0.5 с.

Сравнения спектров, полученных приборами спутника MSX во всех четырех инъекциях (FI-1,2, NS-1,2), показали существенное отличие спектра NS-1, а именно в этом спектре присутствует большое количество линий Al II: Al II (1670.19 Å), Al II (1686.25 Å), Al II (1724.95 Å), Al II (1858.03 Å), Al II (1939.71 Å) (рис. 16).

Спектрограммы, представленные на этом рисунке, видимо, относятся к области взаимодействия первичной плазменной струи с предварительно выпущенным воздухом плотностью, большей, чем плотность ионосферы на высоте 360 км. Это область дополнительной ионизации струи, что показывает увеличенная на два порядка концентрации ионов в инъекции NS-1 по сравнению с инъекцией NS-2. Высокоскоростные приборы OSP, имеющие диапазон измерений от 196 нм, зарегистрировали, начиная с ~3 мс, следующие наиболее сильные линии: OII (2411.6 Å), NII (2496.8 Å), Al I (2575.1 Å), Al II (2669.2 Å), Al I (3082.15 Å), NII (3437.3 Å), OII (3919.3 Å).

Такие же линии наблюдались и приборами спутника MSX. На рис. 17 представлены спектрографические изображения распределения спектральных линий по длине шели для спектрографов MSX, полученные в диапазонах 120–380 и 400–900 нм соответственно.

Высокоскоростные спектры плазменной струи можно надежно наблюдать до ~40 мс, т.е. до того момента, когда передний фронт струи дойдет до модуля OSP. По этим спектрам можно оценить время жизни основных спектральных линий. На рис. 18 показаны развертки по времени наиболее сильных линий, наблюдаемых в это время до 40 мс. Из графика следует, что интенсивность высвечивания первичной струи с возбужденным Al составляет не более 40 мс.

Кроме быстро затухающих линий спектрографы регистрируют и долгоживущие линии. На рис. 19 показаны времена жизни некоторых долгоживущих линий в экспериментах “Флакрус” и “Северная звезда”. Эти линии представляют собой уже свечение плазменной области, которая появилась в результате взаимодействия первичной плазменной струи с окружающей ионосферой, и их интенсивность существенно меньше интенсивности линий первичной струи.

Из рисунка видно, что дольше всего живут линии при инъекции NS-2, видимо, так как окружающая среда при данной инъекции имела наименьшую плотность, причем по данным экспериментов линия возбужденной молекулы азота (3934.3 Å) имела наибольшую продолжительность жизни.

### ОБСУЖДЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разлет высокосортной плазменной струи в ионосфере на высотах 140–360 км представляет собой сложную картину, в процессе которой присутствуют газодинамические, электродинамические и магнитогидродинамические процессы. Отметим некоторые особенности полученных данных.

*Расширение плазменной струи.* Расширению плазменной струи препятствуют внешнее геомагнитное поле и давление окружающей среды. Радиус магнитного удержания  $R_B$ , т.е. радиус, при котором начальная кинетическая энергия равна энергии внешнего геомагнитного поля в объеме  $4/3(\pi R_B^3)$ , вычисляется как [Winske at al., 2019]:

$$R_B = (3\mu_0 M V_{d0}^2 / 4\pi B_0^2)^{1/3},$$

где:  $m_i$  – масса иона и  $n_0$  – плотность ионов окружающей плазменной среды;  $M$  – масса плазмы, расширяющейся с начальной скоростью  $V_{d0}$ ;  $B_0$  – индукция геомагнитного поля в области расширения;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

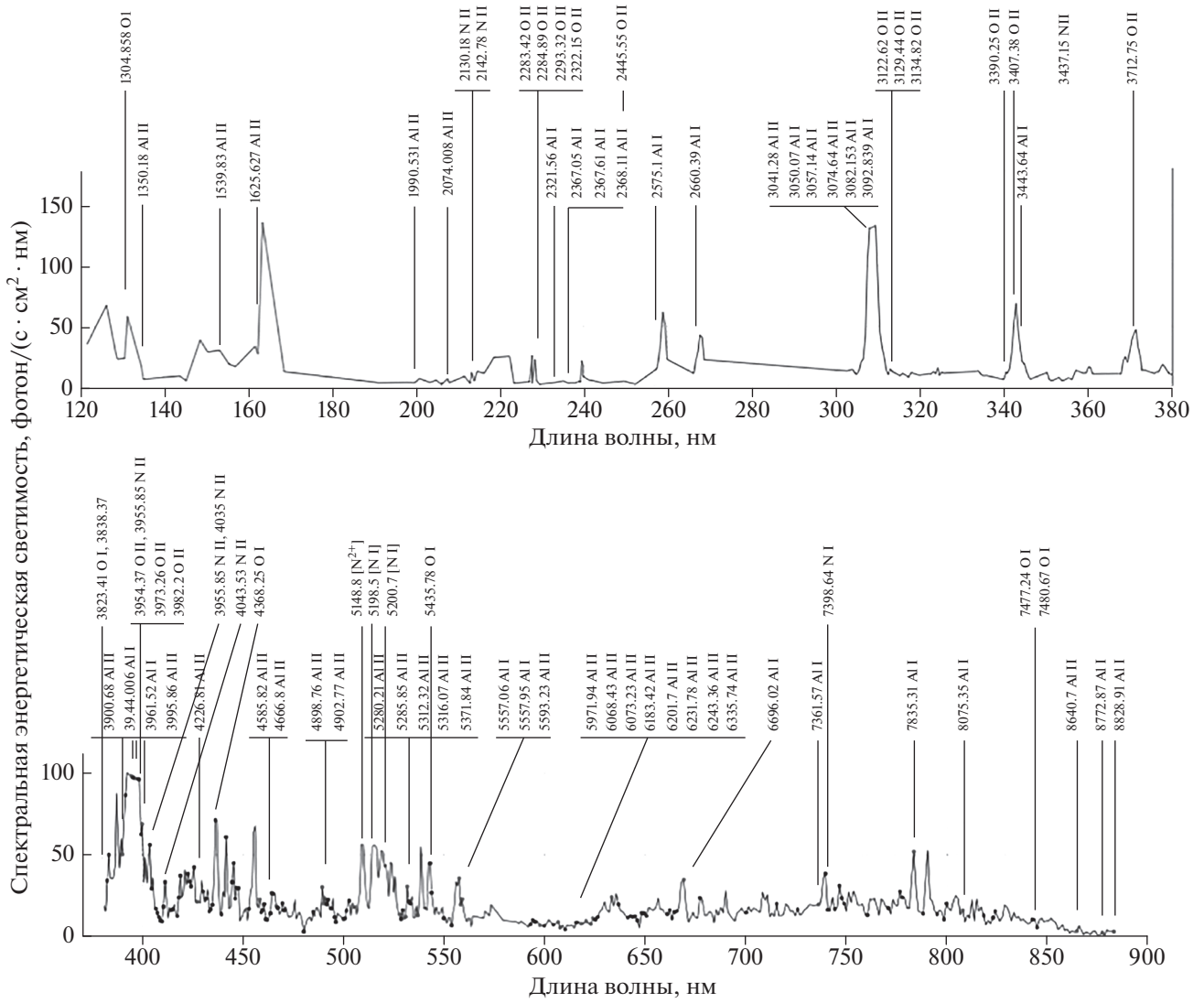


Рис. 17. Спектрографические изображения распределения спектральных линий по длине щели для спектрографов MSX: 120–380 нм (верхняя панель) и 400–900 нм (нижняя панель).

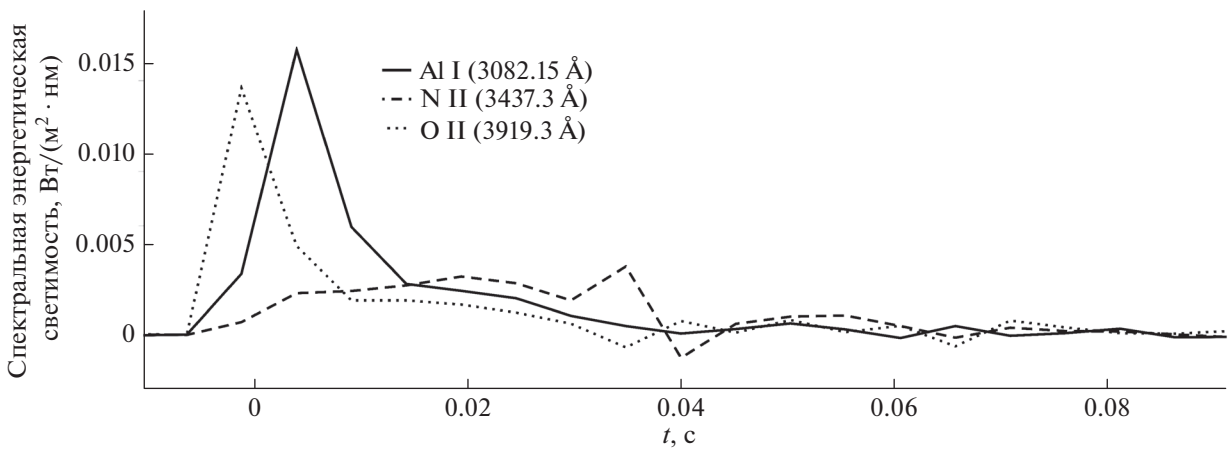


Рис. 18. Развертки по времени наиболее сильных линий, наблюдаемых в период до 40 мс приборами OSP.

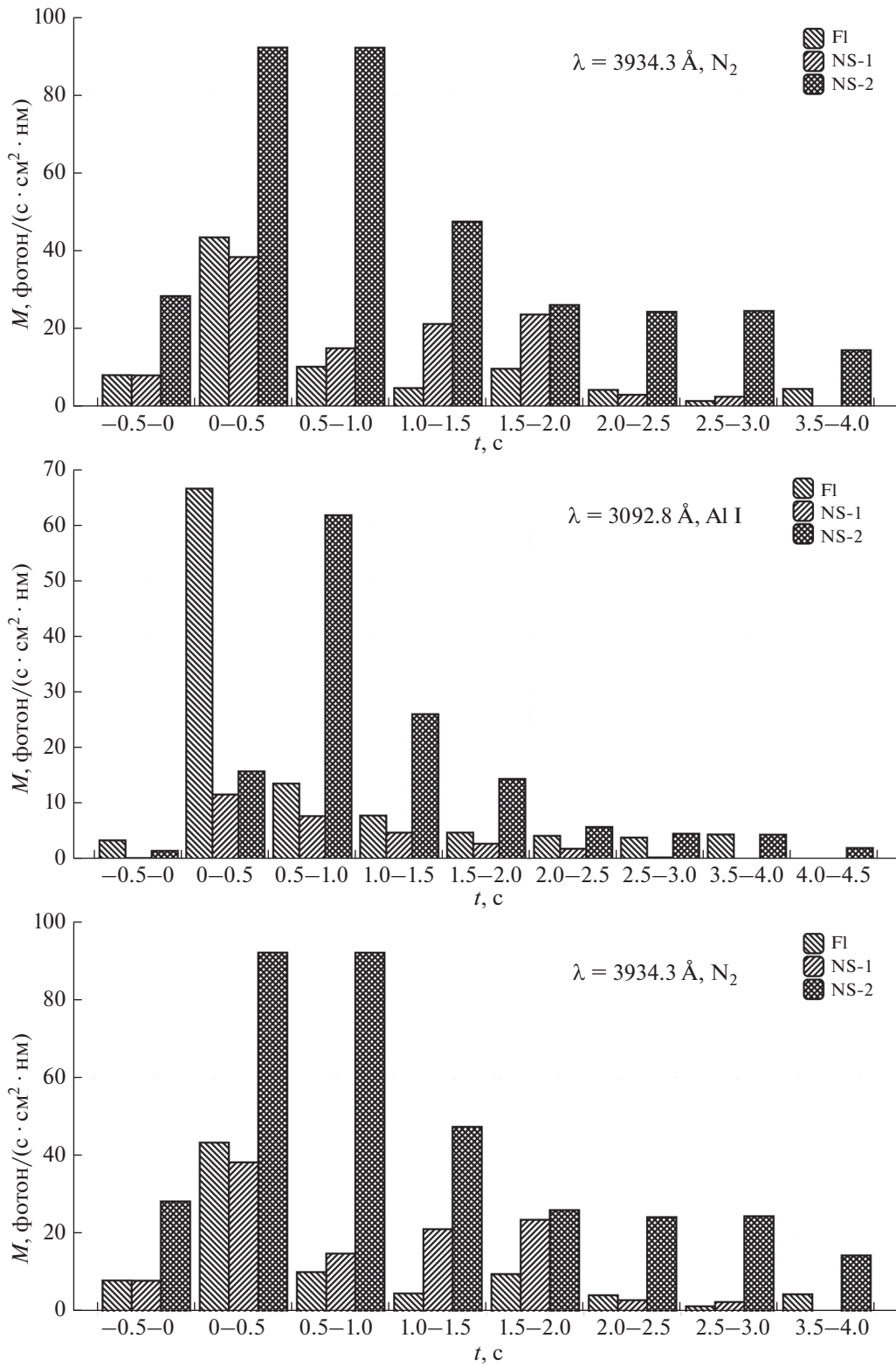


Рис. 19. Времена жизни некоторых долгоживущих линий в экспериментах “Флакрус” и “Северная звезда”.

Радиус равной массы  $R_M$ , т.е. расстояние, при котором расширяющаяся масса плазмы  $M$  сравнивается с эквивалентной массой фоновой плазмы, оценивается отдельно для струи, имеющей разлет в конусе при вершине  $20^\circ$  ( $R_{MJ}$ ), и продуктов взрыва, имеющих сферический разлет ( $R_{ME}$ ). Оценка  $R_B$  проводилась с использованием модели геомагнитного поля IGRF – 13th Generation, а  $R_{MJ}$  и  $R_{ME}$  – с использованием модели атмосферы MSIS 90. Результаты оценок приведены в табл. 2.

Полученные оценки радиусов равной массы для струи  $R_{MJ}$  находятся в противоречии с экспериментальными данными, которые показывают, что струя даже не замедляется на расстояниях  $R_{MJ}$ . Либо в данном случае не работает модель “снежного плуга”, либо масса струи отличается от принятой.

Роль предварительно выпущенного воздуха при инъекции NS-1 также не находит пока объяснения. В частности, необъясненным является тот факт, что это облако воздуха существенно увеличивает как ионизацию струи, так и связанные с этим эффекты (оптическое излучение струи, образование хорошо развитой диамагнитной полости и другие).

Можно только показать, что в области выпущенного воздуха энергия струи сильно поглощается. На рис. 20 приведены распределения энергии струи, измеренной в области существования облака (между генератором струи и модулем ETG-2) с энергиями, измеренными между остальными модулями, где это облако отсутствовало.

Сравнение данных показывает, что в области существования предварительно выпущенного облака теряется более порядка энергии струи. Видимо, эта энергия расходуется на дополнительную ионизацию струи. Однако никаких указаний на механизм этих потерь график не дает.

**Таблица 2.** Оценка радиусов остановки плазменной струи в ионосфере для различных экспериментов

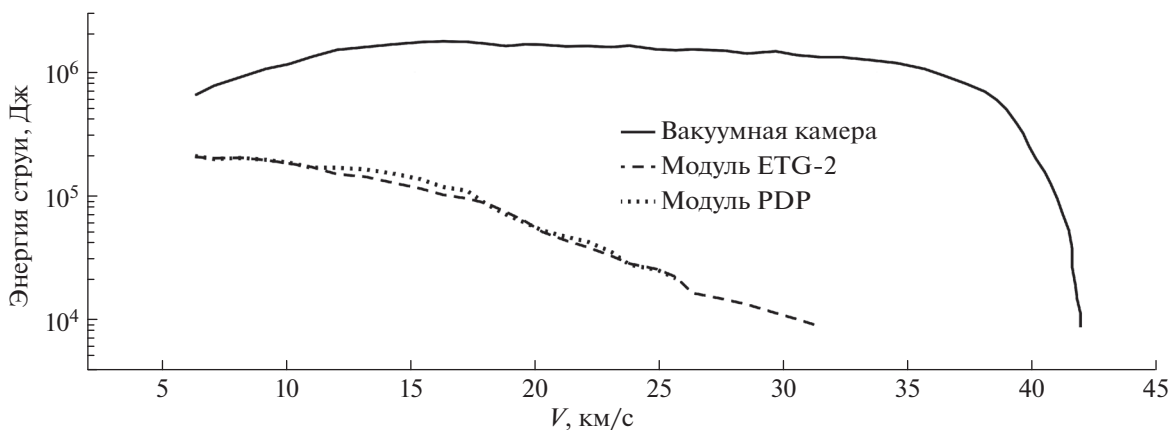
Инъекции	$R_B$ , км	$R_{MJ}$ , км	$R_{ME}$ , км
FI-1.2	1.4	0.6	0.7
NS-1 (в начальной фазе)	1.7	0.7	0.9
NS-1	1.7	5.3	6.6
NS-2	1.7	2.9	3.6

*Спектральные измерения.* Измерения оптических спектров, излучаемых плазмой в диапазоне от УФ до ИК, а также сравнения изображений, полученных в этих диапазонах длин волн, свидетельствует о существовании разных стадий процесса взаимодействия взрывного плазменного генератора с ионосферой.

Первичная высокоскоростная плазменная струя, состоящая, в основном, из ионизованных и возбужденных атомов алюминия (рис. 16), существует в пределах нескольких десятков миллисекунд (рис. 18). По оценкам, за это время ее размер увеличивается до  $\sim 0.1$  км<sup>2</sup>. Судя по данным [Gavrilov et al., 2004; Pfaff et al., 2004], именно в это время происходит формирование диамагнитной полости, возникающей при взаимодействии струи с геомагнитным полем.

Струя возбуждает области ионосферы, занимающие размер около нескольких квадратных километров (рис. 9 и рис. 11). Характерными спектральными линиями этой области являются ионизованные и возбужденные линии воздуха на этих высотах (рис. 17), длительность свечения которых составляет порядка нескольких секунд (рис. 19). Интенсивность этих линий меньше интенсивности свечения линий первичной струи.

Через несколько секунд проявляется более долгоживущее, но более слабое свечение, в ос-



**Рис. 20.** Распределение энергии массы струи по скорости около последовательно расположенных модулей ETG-2 и PDP. Между генератором плазмы и модулем ETG-2 теряется более порядка энергии струи.

новном, в ИК диапазоне. Это свечение продолжается несколько десятков секунд. Область расширяется со скоростью  $\sim 100$  м/с и ее размеры составляют несколько квадратных километров. Нами интерпретируется указанная область свечения как область, соответствующая расширению продуктов взрывчатого вещества и осколков корпуса генератора.

Суммируя изложенные данные оптических измерений, можно представить развитие следующих последовательных стадий взаимодействия взрывного генератора плазмы с ионосферой: *1 стадия* – разлет первичной струи ионизованного алюминия; *2 стадия* – взаимодействие первичной струи с окружающей средой, свечение этой плазменной области взаимодействия в спектральных линиях, соответствующих линиям ионизованных и возбужденных компонентов ионосферы; *3 стадия* – разлет продуктов взрыва с осколками корпуса генератора.

## ВЫВОДЫ

Результаты оптических измерений при инъекциях на высотах 140–300 км ночной ионосферы позволили, с одной стороны, определить особенности использования генераторов взрывного типа в активных экспериментах, с другой – установить некоторые физические механизмы взаимодействия высокоскоростной струи плазмы и продуктов ВВ с окружающей средой.

Установлено, что взрывные генераторы создают плазменную струю, имеющую неравномерную по массе скорость от 7 до 42 км/с, и облако продуктов взрыва. Благодаря конструктивным особенностям, эти два явления разъединены по пространству и по времени, т.е. позволяют определенное время наблюдать эффекты взаимодействия отдельно.

Практически полностью ионизованная алюминиевая плазменная струя, массой 30 г, имеет начальную яркостную температуру  $\sim 2.2$  эВ и значительный высвет в УФ и видимом диапазоне длин волн. Длительность наиболее сильного излучения в УФ диапазоне составляет несколько десятков миллисекунд.

На указанных высотах плотность окружающей среды на расстояниях до 1.4 км от точки инъекции слабо влияет на геометрию струи. Однако выпущенное непосредственно перед инъекцией воздушное облако увеличивает концентрацию ионов струи приблизительно на два порядка, соответственно, увеличивая излучаемую энергию в области взаимодействия струи и выпущенного воздуха.

Область взаимодействия первичной плазменной струи и окружающей ионосферы имеет меньшую интенсивность излучения при более дли-

тельном существовании (до нескольких секунд). Спектральные линии этого излучения, в основном, принадлежат газовым составляющим ионосферы, в которых присутствуют линии, специфичные для искусственной Авроры.

Облако продуктов взрыва излучает в ИК диапазоне, имеет существенно большую длительность – десятки секунд, и большие размеры.

Указанные выводы относятся только к результатам оптических измерений. Хорошо развитая диагностика электродинамических, магнитогидродинамических процессов, а также измерения энергетических спектров ионов и электронов обеспечили выявление широкого класса механизмов взаимодействия плазменной струи с окружающей ионосферой. Результаты реанализа упомянутых выше активных экспериментов, рассматривающие эти механизмы, предполагается сообщить в последующих статьях.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Программы Президиума РАН № 56 (№ 0146-2018-0001).

## 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 РФ. 2000.
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л.* Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: ИФЗ РАН. 2004.
- Гущин М.Е., Коробков С.В., Терехин В.А., Стриковский А.В., Гундорин В.И., Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Николенко А.С.* Эксперименты по моделированию динамики плотного плазменного облака, расширяющегося в замагниченную фоновую плазму, на крупномасштабном стенде “Крот” // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108. Вып. 6. С. 416–421.
- Жмайло В.А., И.В. Соболев, Широков А.Е.* Расчеты  $\gamma$ -зари космического ядерного взрыва операции “Морская звезда” // Вопросы атомной науки и техники: Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2019. Вып. 3. С. 39–43.
- Захаров Ю.П., Тищенко В.Н., Антонов А.И., Мелехов А.В., Посух В.Г., П.А., Перекопов В.А. Терехин В.А.* Генерация сгустков лазерной плазмы с высокой эффективностью концентрации энергии для лабораторного моделирования бесстолкновительных ударных волн в замагниченной космической плазме // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 5. С. 399–405.
- Ступицкий Е.Л., Холодов А.С.* Физические исследования и математическое моделирование крупномас-



- штабных геофизических экспериментов. Долгопрудный: изд. дом “Интеллект”. 2019.
- Тищенко В.Н., Захаров Ю.П., Шайхисламов И.Ф., Березуцкий А.Г., Бояринцев Э.Л., Мелехов А.В., Пономаренко А.Г., Посух В.Г., Прокопов П.А.* Торсионная альфвеновская и медленная магнитозвуковая волны, создаваемые плазмой в магнитном поле // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 104. Вып. 5. С. 303–305.  
https://doi.org/10.7868/S0370274X16170021
- APL Report. Active Plasma Experiment. *APL* Doc. 2000. № APEX-APL-00 H.
- Borovsky J.E., Delzanno G.L.* Active Experiments in Space: The Future. *Front // Astron. Space Sci.* 2019. V. 6. № 31.  
https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00031
- Delzanno G.L.* Active Experiments in Space: New Capabilities and Innovations in Support of Space Science. AGU Fall Meeting 2020. Abstract.
- Delzanno G.L., Borovsky J.E., Mishin E.V.* (eds.) Active Experiments in Space: Past, Present, and Future. Lausanne: Frontiers Media SA. 2020. Doi:  
https://doi.org/10.3389/978-2-88963-659-4
- Dupont D.G.* Nuclear explosions in orbit // *Sci. Am.* 2004. V. 290. P. 100–107.  
https://doi.org/10.1038/scientificamerican0604-100
- Dyal P.* Particle and field measurements of the Starfish diamagnetic cavity // *J. of Geophys. Res.* 2006. V. 111. № A12.  
https://doi.org/10.1029/2006JA011827
- Erlandson R.E., Swaminathan P.K., Meng C.I., Stoyanov B.J., Zetzer J.I., Gavrilov B.G., Kiselev Yu.N., Romanovsky Yu.A.* Observation of auroral emissions induced by artificial plasma jets // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. № 11. P. 1553–1556.
- Erlandson R.E., Meng C.-I., Zetzer J.I., Kiselev Y., Gavrilov B.G., Stenbaek-Nielsen H., Lynch K.A., Pfaff R.F., Swaminathan P.K., Kumar C.K., Dogra V.K., Stoyanov B.J., Delamere P.A., Bounds S., Gatsonis N.A.* The APEX north star experiment: observations of high-speed plasma jets injected perpendicular to the magnetic field // *Adv. Space Res.* 2002. V. 29(9). P. 1317–1326.  
https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00183-7
- 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., Lynch K.A., Pfaff R.F., Delamere P.A., Bounds S., Gatsonis N.A.* North Star Plasma-Jet Experiment // *J. Spacecr. Rockets* 2004. V. 41. № 4. P. 483–489.
- Pfaff R.F., Freudenreich H.T., Bounds S.R., Delamere H.A., Erlandson R.E., Meng C.I., Zetzer J.I., Gavrilov B.G.* Electric Field, Magnetic Field and Density Measurements on the Active Plasma Experiment // *J. Spacecraft and Rockets.* 2004. V. 41. № 4. P. 521–532.
- Gavrilov B.G., Podgorny I.M., Sobyenin D.B., Zetzer J.I., Erlandson R.E., Meng C.I., Pfaff R.F., Lynch K.A.* North Star Plasma Experiment Particles and Electric and Magnetic Field Measurements // *J. Spacecr. Rockets.* 2004. V. 41. № 4. P. 490–495.
- Ganguli G., Crabtree C., Mithaiwala M., Rudaov L., Scales W.* Evolution of lower hybrid turbulence in the ionosphere // *Phys. Plasmas.* 2015. V. 22. P. 112904.  
https://doi.org/10.1063/1.4936281
- Grandal B.* (eds.) Artificial Particle Beams in Space Plasma Studies. New York, NY: Plenum Press. 1982.  
https://doi.org/10.1007/978-1-4684-4223-6
- Hassanali Akbar, Robert Pfaff, et al.* Resonant Alfvén Waves in the Lower Ionosphere During an Active Aurora. Observations by Electric and Magnetic Field Probes on a Dual Sounding Rocket Experiment. AGU Fall Meeting. 2020. Abstract.
- Haerendel G., Paschmann G., Baumjohann W., Carlson C.W.* Dynamics of AMPTE artificial comet // *Nature.* 1986. V. 320. P.720.
- Haerendel G., Sagdeev Z.* Artificial Plasma Jet in the Ionosphere // *Adv. Space Res.* 1981. V. 1. P. 29–46.
- Haerendel G.* Experiments with plasmas artificially injected into Near-Earth space // *Front. Astron. Space Phys.* 2018. V. 22.  
https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00029
- Howes G.* Laboratory space physics: investigating the physics of space plasmas in the laboratory // *Phys. Plasmas.* 2018. V. 25. P. 055501.  
https://doi.org/10.1063/1.5025421
- Inan U.S., Bell T.F., Bortnik J., Albert J.M.* Controlled precipitation of radiation belt electrons // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. P.1186.  
https://doi.org/10.1029/2002JA009580
- James H.G., Raitt W.J., Sulzer M.P.* Preface active experiments in space physics // *Adv. Space Res.* 1998. V. 21. № 7. P. 917–1041.
- Krimigis S.M., Haerendel G., McEntire R.W., Aschmann G.P., Bryant D.A.* The Active Magnetospheric Particle Tracer Explores Program // *Johns Hopkins APL Technical Digest.* 1983. V. 4. № 1.
- Lynch K.* Exploring near Earth space with sounding rockets. AGU Fall Meeting. 2020. Abstract.
- Mishin E.M.* Artificial aurora experiments and application to natural aurora // *Front. Phys.* 2019. V. 6. № 14.  
https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00014
- Pongratz M.* History of Los Alamos participation in active experiments in space // *Front. Phys.* 2018. V. 6. № 144.  
https://doi.org/10.3389/fphy.2018.00144
- Prech L., Ruzhin Y.Y., Dokukin V.S., Nemecek Z., Saftankova J.* Overview of APEX Project results // *Front. Astron. Space Sci.* 2018. V. 5. № 46.  
https://doi.org/10.3389/fspas.2018.00046
- Raitt W.J.* Stimulating our piece of the universe: active experiments in space // *Rev. Geophys.* 1995. V. 33. P. 559–564.  
https://doi.org/10.1029/95RG00102
- Remington B.A., Drake R.P., Takabe H., Arnett D.* A review of astrophysics experiments on intense lasers // *Phys. Plasmas.* 2000. V. 7. P. 164.
- Santos-Costa D.* Kinetic-scale energy and momentum transport experiment (KiNET-X): expectations for ion and electron heating. AGU Fall Meeting. 2020. Abstract.
- Starodubtsev M., Korobkov S., Gushchin M., Grach S., Nazarov V.* Ducting of upper-hybrid waves by density depletions in a magnetoplasma with weak spatial dispersion // *Phys. Plasmas.* 2019. V. 26. P. 072902.  
https://doi.org/10.1063/1.5099338

*Unan I., Rietveld M.T.* Active experiments in space physics // Adv. Space Res. 1995. V. 15. № 12. P. 1–156.

*Winske D., Huba J.D., Niemann C., Le A.* Recalling and updating research on diamagnetic cavities: experiments, theory and simulations // Front. Astron. Space Sci. 2019. V. 5.

№ 51.

<https://doi.org/10.3389/fspas.2018.00051>

*Winckler J.R.* Controller experiments in the earth's magnetosphere with artificial electron beams // Rev. Mod. Phys. 1992. V. 64. № 3.

## **Active Experiments in the Ionosphere at Altitudes of 140–360 km. Optical Observations Results Reanalysis**

**Yu. I. Zetzer<sup>a, \*</sup>, Yu. V. Poklad<sup>a</sup>, and R. E. Erlandson<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

<sup>b</sup>*Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Baltimore, MD 21218 USA*

*\*e-mail: zetzer@idg.chph.ras.ru*

Dynamics of complex plasma structures, that drive precipitation and current systems into the ionosphere, produce a multitude of physical and geophysical effects that present unresolved mysteries in our understanding of the cross-geospace coupling. High-altitude active experiments that produce high-speed plasma injections play a crucial role in solving this outstanding mystery. In particular, the experiments at various ionospheric heights give an insight into the spatial and temporal effects triggered by plasma flows. Such effects include optical radiation in a broad range of wavelength that give an insight into hydrodynamic and physical-chemical effects. Due to early active experiments as “Fluxus” and “North Star” much data had being acquainted, processed and and actively discussed. In the present paper we revision these data, acquired with ground based measurements, a satellite, and geophysical rockets.

*Keywords:* active geophysical rocket experiment, interaction of a plasma jet with a rarefied ionosphere, chemical explosion in a rarefied ionosphere, optical radiation of gas-dynamic processes