

7. Г. Шлихтинг. Теория пограничного слоя. М.: ИЛ, 1954.
8. С. С. Кутателадзе. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979.
9. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике/Под ред. М. К. Кошкина. М.: Машиностроение, 1975.
10. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанец. Теория детонации. М.: Гостехиздат, 1955.
11. Я. Б. Зельдович, С. М. Когарко, Н. Н. Симонов. ЖЭТФ, 1956, 26, 8, 1744.
12. А. Г. Абинов, А. М. Чеховских.— В кн.: Детонация. Черногоровка, 1978.
13. D. I. Bull. Trans. Amer. Inst. Chem. Eng., 1978, 57, 219.
14. W. V. Benedick. Comb. Flame, 1979, 35, 1, 87.
15. Matsui. 19-th Japan. Symp. on Combust., 1981.

*Поступила в редакцию 10/VII 1986*

### ВЗРЫВНЫЕ ИНЖЕКТОРЫ ПЛАЗМЫ В ИССЛЕДОВАНИИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

*Ю. Я. Ружин, В. С. Скомаровский, И. А. Стадниченко,  
В. М. Титов, Г. А. Швецов  
(Троицк, Новосибирск)*

Среди проводимых в настоящее время активных экспериментов в космосе важные результаты получены с помощью экспериментов с инъекцией различных химических веществ. Эксперименты с инъекцией используются для трассирования химических или физических процессов, позволяя проводить диагностику естественного состояния космической среды. С помощью инъекции можно вызвать возмущение среды, стимулировать естественные или искусственные процессы геофизического характера. Кроме того, такие эксперименты позволяют проводить изучение фундаментальных свойств космической плазмы [1].

В качестве инжектируемых материалов в зависимости от задач применяются различные реагенты: натрий, калий, литий, стронций, барий, окись азота, этилен, вода, триметилалюминий и др. Инъекция металлов с низким потенциалом ионизации позволяет создавать плазменные облака с концентрацией плазмы ( $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$ ) и температурой (несколько электрон-вольт), превышающими на порядок или более фоновые. Инъекция воды или водородсодержащих веществ в ионосфере приводит к образованию области с пониженным содержанием электронной концентрации, своеобразной «дыры» в ионосфере.

Каждое из этих веществ само излучает или, взаимодействуя со средой, приводит к свечению в видимой области спектра или вызывает заметное изменение, модификацию фонового свечения. Механизм свечения искусственных облаков может быть резонансным, например при инъекции бария, стронция, натрия, или хемолуминесцентным при инъекции окиси азота, этилена. Барий оказался наиболее подходящим для таких экспериментов элементом, так как легко испаряется, быстро фотоионизируется, резонансно рассеивает солнечный свет в линиях оптического диапазона. Наличие ярких линий позволяет вести наблюдения за инжектированными облаками бария с помощью оптических средств с поверхности Земли.

Первоначально испарение и выброс бария производились в результате термичного горения барийсодержащих смесей. В первых экспериментах выбрасывалось небольшое количество (менее 1 кг) нейтрального пара бария для изучения электрических полей [2]. В 70-х годах начали использовать кумулятивные заряды для создания плазменных струй. Благодаря большой скорости направленного движения (более 10 км/с) бариевая струя может «высветить» силовую линию геомагнитного поля до больших высот. В результате оказывается возможно проследить как форму силовой линии, так и изменение напряженности электрического поля вдоль силовой линии по движению отдельных участков струи. Для этого

инжекция струи проводится на больших высотах (около 500 км), где торможение на остаточной атмосфере незначительно [3].

При кумулятивной инжекции струи в нижней ионосфере (слои *E* и *F*) появляется возможность постановки новых задач. В этом случае произойдет быстрое торможение кумулятивной струи с образованием плотного ступка барьерной плазмы. Изучение поведения таких барьерных ступков важно для целей диагностики ионосферы. Кроме того, исследование эволюции искусственных плазменных неоднородностей представляет интерес для физики плазмы, изучения механизмов диффузии слабоионизованной плазмы в магнитном поле. Движение сверхзвуковой кумулятивной струи в нижней ионосфере приведет к образованию ионизованного ударного фронта и, следовательно, к локальному возмущению геомагнитного поля. Таким образом, появляется возможность моделирования некоторых геофизических эффектов, например высыпания частиц захваченной радиации.

### Техника экспериментов

Для решения космофизических задач к устройствам, инжектирующим струи, предъявляются определенные требования:

- возможность легкой фотоионизации металлического пара в струе за время менее 50 с [4];
- наличие сильных резонансных линий ионов в видимом спектре для возможности фотографирования с Земли;
- максимальность коэффициента превращения энергии взрыва в кинетическую энергию струи;
- максимальность массовой скорости движения струи (для осуществления ударной ионизации скорость струи должна быть  $\geq 8$  км/с, а с учетом трения об остаточную атмосферу для преодоления гравитационного поля Земли  $\geq 10$  км/с [5]);
- минимальность градиента скорости по всей длине струи;
- максимальность выхода металлического пара на единицу массы устройства;
- концентрация импульса струи в одном направлении.

Первые два условия идеально выполняются для барьерных вкладышей, а реализация остальных зависит от вида взрывных инжекторов.

Требования к массе и размерам в ракетных экспериментах заставляют ограничиться самыми экономичными источниками энергии для испарения металлов. Применялись различные виды инжекторов (рис. 1) [3].

Для термической инжекции веществ (рис. 1, *a*) используются экзотермические реакции между окисью одного металла и другим металлом для создания парообразной фазы. Например, реакция между  $\text{CuO}$  и металлическим барием дает достаточно тепла для испарения некоторого количества Ва. Во время реакции в инжекторе создается повышенное давление, что приводит к истечению паров бария с  $u \approx 1,1$  км/с в телесном угле  $\approx 2^\circ$ . Эффективность испарения таких инжекторов составляет  $\sim 10\%$  от массы заряда: канистра с 8 кг термитной смеси дает  $\approx 3 \cdot 10^{24}$  атомов бария.

Плоские заряды ВВ (рис. 1, *б, в*) при относительно высокой эффективности испарения металла (30–50%) могут обеспечить лишь скорости, не превышающие скорости детонации ( $\leq 8$  км/с).

Испарение металла в кумулятивном инжекторе (рис. 1, *г, д*) происходит в результате кумулятивного схлопывания вкладыша под действием волны, генерированной зарядом ВВ. Направленная удельная кинетическая энергия струи достигает 50 кДж/г, что превышает примерно в 10 раз удельную энергию ВВ. Скорость струи может превышать 15 км/с. Важное свойство кумулятивных зарядов — их высокая эффективность: более 20% химической энергии превращается в кинетическую энергию вещества вкладыша. Степень испарения инжектора зависит от конфигурации ударной волны в схлопывающейся выемке и сжимаемости материала вклады-

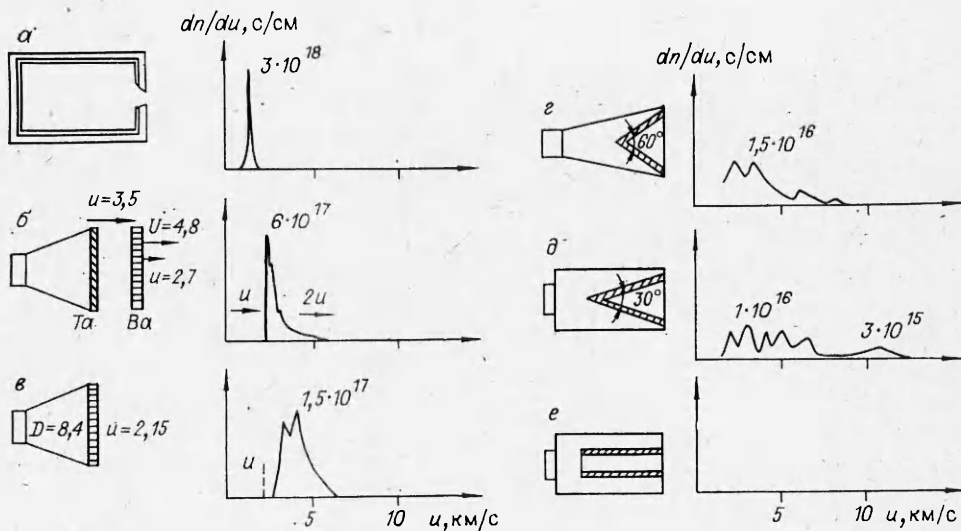


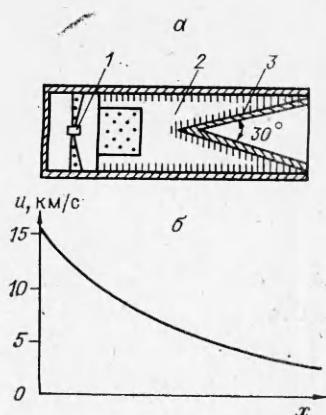
Рис. 1. Схемы создания парообразных металлических струй для активных космофизических экспериментов [3].

а) термическое испарение  $2,5\text{Ba} + \text{CuO}$  или  $12\text{Ba} + \text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\varphi = 0,2$ ; б, в) ударное испарение,  $\varphi = 0,5$  (б),  $0,27$  (в); г, д, е) испарение с помощью кумулятивных зарядов,  $\varphi = 0,1$  (г),  $0,2$  (д) и  $0$  (е) ( $dn/du$  — распределение атомов по направленной скорости  $u$ ;  $D$  — скорость детонации, км/с;  $U$ ,  $u$  — скорости ударной волны и массовая, км/с;  $\varphi$  — степень испарения).

ша и в зависимости от этих величин может изменяться от 0,5 до 20% массы вкладышей.

Применение кумулятивных зарядов ВВ для испарения и ускорения металлов в космических исследованиях началось сравнительно недавно, и отработка зарядов с целью создания более эффективных ведется и в настоящее время. Наиболее детальные исследования кумулятивных зарядов для создания высокоскоростных парообразных струй проведены Михелем [3]. В лабораторных экспериментах на модельных зарядах и численным моделированием выяснено, при каких параметрах обеспечивается достижение основных названных выше требований. Обобщенная схема кумулятивного инжектора приведена на рис. 2, а. При детонации такого заряда вдоль оси полости выбрасывается высокоскоростная струя паров металла вкладыша. Характерное распределение массовой скорости вдоль струи представлено на рис. 2, б. Инжектор такой геометрии, использовавшийся в активных экспериментах при угле  $2\alpha = 30^\circ$ , имеет эффективность испарения бария  $\approx 12\%$ . Эффективность превращения энергии ВВ в кинетическую энергию для такой геометрии  $\approx 30\%$ . Как видно из рис. 2, градиент массовой скорости вдоль струи довольно большой. При этом с  $u > 10$  км/с движется лишь малая часть струи ( $\approx 2\%$  массы вкладыша).

Некоторое улучшение параметров получено при использовании явления кумуляции в цилиндрической полости.



Модельные эксперименты, проведенные с зарядами с цилиндрическими выемками, показали, что при определенных условиях можно добиться развития устойчивой кумулятивной струи в цилиндрическом канале и выхода в струю значительной массы металла вкладыша. Такие условия наблюдаются при выполнении определенных соотношений между длиной цилиндрического канала  $l$ , его внешним  $d_2$  и внутренним

Рис. 2. Схема кумулятивного инжектора (а) и характерное распределение массовой скорости вдоль струи от кумулятивного инжектора (б).

1 — илицирующее устройство; 2 — заряд ВВ; 3 — конус из металла.

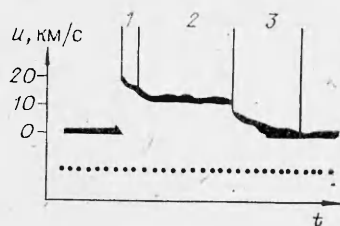


Рис. 3. Оциллограмма массовой скорости от трубчатого газокумулятивного заряда ВВ. Частота меток времени 2,5 МГц. 1 — высокоскоростной фронт струи; 2 — основная часть струи; 3 — «хвост» струи.

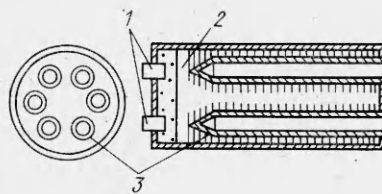


Рис. 4. Схема инжектора ячеистой конструкции. 1 — инициирующая система; 2 — взрывчатое вещество; 3 — металлические вкладыши.

$d_1$  диаметрами, толщиной и плотностью металлического вкладыша. В частности, должны выполняться условия

$$10d_1 \leq l \leq 50d_1, \quad d_2 \geq 3d_1. \quad (1)$$

Проведенные исследования работы трубчатого газокумулятивного заряда объясняют неудачную попытку Михеля использовать такой заряд в качестве инжектора бариевого пара для космофизических приложений [3]: заряд с  $l \approx 2,1d_1$  давал практически нулевой выход пара бария при обжатии вкладыша (см. рис. 1, e). Такой отрицательный результат получен из-за того, что не выполнено требование (1), ибо на длине  $\approx 5d_1$  происходит формирование струи.

Модельные эксперименты выполнялись с трубчатым зарядом ВВ из ТГ 50/50 с необлицованной внутренней полостью и с облицовкой из дюралюминия, близкого по сжимаемости и акустическим свойствам к барию. Массовая скорость определялась по величине ЭДС, индуцированной при движении ионизованного газа в поперечном магнитном поле [6]. Оциллограмма массовой скорости представлена на рис. 3.

На фронте струи  $u \approx 17$  км/с, короткий участок кривой за фронтом соответствует  $\approx 14,4$  км/с, скорость «плато»  $\approx 11$  км/с. Основная масса высокоскоростной части струи приходится на «плато» — участок с минимальным градиентом скорости. Всего с  $u > 10$  км/с движется  $\approx 13\%$  массы вкладыша.

Проведенные с одиночными трубчатыми зарядами опыты позволяют сделать вывод, что существует некоторый активный слой ВВ, определяющий образование и энергию струи. Наружный слой ВВ по отношению к этому слою является по существу инертной оболочкой. Для уменьшения количества ВВ, выполняющего роль пассивной оболочки, предложено использовать многоканальную (ячеистую) структуру заряда ВВ. Форма, размеры каналов, а также геометрия их расположения могут быть различными. Исследования многоканальных газокумулятивных систем проводятся в Институте гидродинамики СО АН СССР.

Эффективность преобразования химической энергии ВВ в кинетическую энергию струи для многоканальных систем достигает 40% [6]. На рис. 4 приведена схема одного из вариантов инжектора ячеистой конструкции. Оценки показывают, что на ее основе возможно создание заряда, способного испарить и выбросить несколько килограммов паров бария. Коническая конструкция не допускает такой возможности.

#### Некоторые геофизические задачи и результаты экспериментов с использованием взрывных инжекторов плазмы

Измерения электрических полей и ветров — одна из задач экспериментов с термической инъекцией бария в ионосфере. Метод измерений, основанный на анализе движения ионизованных облаков, разработан в Институте Макса Планка (ФРГ) [7]. На высотах 200—300 км, где обычно производится инъекция, величину и направление электрического поля  $\vec{E}$

можно определить по значению  $\vec{u}_\perp$ :

$$\vec{E}_\perp = \frac{1}{c} (\vec{B} \times \vec{u}_\perp).$$

Здесь  $c$  — скорость света;  $\vec{B}$  — индукция магнитного поля;  $\vec{u}_\perp$  — массовая скорость облака.

Применять это выражение можно при малом возмущении проводимости, которое создает облако  $\text{Ba}^+$  в ионосфере, что выражается соотношением

$$\Sigma_p^{\text{обл}} < \Sigma_p^{\text{ион}},$$

где  $\Sigma_p^{\text{обл}}$ ,  $\Sigma_p^{\text{ион}}$  — проинтегрированные вдоль силовой линии педерсеновские проводимости силовой трубки, занятой облаком, и окружающей ионосферы. Преимущество этого метода измерения состоит в простоте, надежности, хорошем разрешении в пространстве и возможности проведения относительно длительных наблюдений в одной и той же области ионосферы. Такой способ измерения  $\vec{E}_\perp$  широко применяется в космофизических исследованиях [7].

Первые эксперименты по трассированию силовых линий геомагнитного поля кумулятивными зарядами проведены в трубке с  $L = 1,24$  ( $L$  — параметр Мак-Илвейна для геомагнитного поля) [8]. Так как наблюдения за ионами  $\text{Ba}^+$  проводились на обоих концах силовой трубки, эти эксперименты позволили провести измерения электрических полей в сопряженных точках. Результаты показали, что существующие модели геомагнитного поля несовершенны. Установлено, что дрейфы на северном и южном концах трубки значительно отличались по величине и направлению. Полученное различие в величинах электрических полей в сопряженных точках может служить свидетельством неэквипотенциальности силовых линий.

Эксперименты с инъекцией кумулятивных струй проводились и на высоких широтах ( $L \approx 6$ ) [9], где силовые линии разомкнуты. В эксперименте «Оосик» ионная струя наблюдалась с помощью телеустановок до высот  $\approx 13000$  км. Отмечено, что восточно-западное движение барьерной струи изменилось, как только основание трубки со струей пересекло авроральную структуру. Считается, что это может служить указанием существования соответствующего токового слоя около  $0,08$  А/м, направленного вверх из структуры. Таким образом, в [9] показано, что кумулятивные струи можно применять для исследования продольных токов.

С помощью кумулятивных струй получены первые определенные данные, свидетельствующие о существовании параллельных электрических полей или потенциальных двойных слоев в магнитосфере [10]. Такие поля действуют на движение ионов ускоряющим или замедляющим образом. Ион барьера, движущийся в магнитосфере со скоростью  $10$ — $15$  км/с, имеет кинетическую энергию  $\sim 100$  эВ. Скачок потенциала в несколько сотен вольт или более может вызвать обнаружимые эффекты воздействия на скорость распространения ионной струи. В эксперименте, проведенном учеными ФРГ, впервые обнаружено подобное ускорение ионов струи, соответствующее  $\approx 170$  эВ [10].

В эксперименте «Камео» проводилась термическая инъекция барьера со спутника на высоте  $\approx 965$  км в полярной области [11]. Наблюдения с Земли показали, что когда атомы  $\text{Ba}$  (движущиеся с  $u \approx 7,5$  км/с поперек  $B$ ) ионизовались, появлялся поток холодных ионов через фоновую плазму — это плазменная струя вызвала появление электростатических неустойчивостей, которые привели к термализации и замедлению ионов струи. Оказалось, что положение верхней и нижней частей струи можно связать с коллективными эффектами, меняющимися пич-угловое распределение ионов. Кроме того, характер движения верхней части струи ясно указывал на существование ускоряющегося вверх слоя на

высоте  $\approx 2000$  км. Величина ускорения может быть объяснена существованием  $E_{\parallel} \sim 1000$  В.

Инижекция химических веществ применяется для создания сильного возмущения в космической среде. В эксперименте «Триггер» делалась попытка с помощью взрывного инжектора импульсным образом увеличить поперечную проводимость ионосферы в авроральной зоне [12]. В эксперименте подрывалось 12 кг смеси ТНТ —  $\text{AlO}$  —  $\text{CsNO}_3$  на высоте 164 км. В противоположность бария низкий потенциал ионизации Cs приводит к его значительной ионизации в момент взрыва. Практически мгновенно образуется очень плотное облако горячей плазмы. Возмущение проводимости привело к образованию значительных продольных токов, как во время полярных сияний. Бортовые приборы зарегистрировали значительные изменения потоков частиц и полей, резко увеличились потоки частиц в диапазоне энергий от 10 эВ до 300 кэВ. Импульс электрического поля составил 200 мВ/м.

Эксперимент «Вотерхоул», проведенный в 1980 г. в Канаде, может служить примером опыта с сильным возмущением космической среды. В результате получено возмущение противоположного эксперименту «Триггер» характера. На высоте 300 км с помощью взрывного инжектора общей массой 88 кг выброшено  $1,3 \cdot 10^{27}$  молекул  $\text{H}_2\text{O}$  [13]. Диссоциативная рекомбинация и перезарядка привели к образованию области (радиусом 25 км) с пониженным содержанием электронной концентрации. Приборы зарегистрировали уменьшение в 30 раз потока электронов с энергией 500 кэВ, который возникал после инжекции и наблюдался 2 мин.

В нашей стране впервые в 1975 и 1978 гг. ИЗМИРАНом совместно с Институтом гидродинамики им. М. А. Лаврентьева и рядом других организаций подготовлено и проведено два ракетных эксперимента с кумулятивной инжекцией бария в нижней ионосфере в средних широтах [14—21]. Цель работы заключалась в комплексном экспериментальном исследовании эффектов кумулятивной инжекции бария в нижней ионосфере, исследовании механизмов расплывания понижованных неоднородностей в ионосфере и возможности стимулирования высыпания электронов внутреннего радиационного пояса, а также в разработке и создании эффективных кумулятивных инжекторов бария.

При подготовке к проведению экспериментов разработано три и реализовано две конструкции кумулятивных инжекторов бария, включая разработку технологии изготовления тонкостенных вкладышей для инжекторов из металлического бария.

Первая конструкция — конический ( $2\alpha = 30^\circ$ ) кумулятивный инжектор — использовалась в эксперименте «Сполох-1» (1975 г.). При массе  $\approx 12$  кг ВВ и бариевом вкладыше  $\approx 1,2$  кг выход в струю составлял  $\approx 1,5$  г-моля испаренного бария. Максимальная скорость струи  $u_{\text{max}} = 12$  км/с.

На основании модельных экспериментов и расчетов разработана ячеистая конструкция инжектора, состоящего из шести цилиндрических полостей. При массе 3,5 кг ВВ инжектор содержал 660 г металлического бария. В струю выходило  $\sim 1$  г-моля паров бария с  $u = 11 \div 17$  км/с. Распределение массовой скорости имеет малый градиент (см. рис. 3). Большая часть испаренного бария выходит в струю с  $u > 11$  км/с. Эффективность превращения энергии взрыва в кинетическую для такого инжектора может достигать 40%. Вероятно, использование ячеистых инжекторов перспективно в магнитосферных экспериментах для проведения измерений продольных электрических полей.

В эксперименте «Сполох-1» основная задача состояла в изучении поведения понижованного бариевого сгустка в ионосфере. Инжектор устанавливался на головной части ракеты, при его срабатывании бортовой служебно-измерительный комплекс разрушался. Измерения и наблюдения проводились наземными оптическими и радиофизическими средствами. Оптические средства включали высокочувствительные теле-



Рис. 5. Схема эксперимента «Сполох-2» с илжекцией кумулятивной струи в поносферу.

1 — предохранительно-исполнительный механизм; 2 — заряд ВВ; 3 — блок научной аппаратуры; 4 — ракета;  $\vec{B}$  — магнитное поле Зем.ш. Высота 60 км, скорость отделения контейнера от ракеты 10 м/с.

установки, аэрофотокамеры, ЭОПы. Наблюдения велись как в интегральном свете, так и в линиях нейтрального (5535 Å) и понизованного (4554 и 4934 Å) бария. Во время эксперимента проводилось радиолокационное зондирование области илжекции на частотах 22 и 33 МГц (13 и 8 м).

В эксперименте «Сполох-2» ячеистый илжектор отстреливался от ракеты МР-12 на восходящей ветви траектории (рис. 5). Срабатывание илжектора произошло при расстоянии между илжектором и ракетой ~1000 м в апогее траектории ракеты. При срабатывании илжектора кумулятивная струя выбрасывалась в направлении ракеты с бортовыми измерительными приборами. Ставилась задача исследовать процессы, происходящие при торможении кумулятивной струи в поносфере, возможности стимулирования высыпания электронов внутреннего радиационного пояса движением высокоскоростной понизованной струи под углом к геомагнитной силовой линии.

Для изучения этих эффектов, а также для регистрации параметров кумулятивной струи на борту ракеты были установлены радиочастотные масс-спектрометры (определение Ва, Ва<sup>+</sup>, компонентов атмосферы), понная ловушка (измерение суммарной концентрации ионов), зонд Ленгмюра (нахождение электронной температуры), импедансный зонд (фиксирование концентрации электронов), счетчик Гейгера (подсчет электронов с энергией >40 кэВ). Кроме того, производились наземные оптические наблюдения и радиолокационное зондирование, как и в «Сполохе-1».

Таким образом, в двух экспериментах проводились наблюдения и измерения по начальной стадии илжекции струи и по диффузионной стадии расплывания бариевых облаков с помощью различных оптических средств и РЛС. В «Сполохе-2» проведена бортовая регистрация начальной стадии движения кумулятивной струи и сопутствующих эффектов в поносфере. Она показала, что при движении кумулятивной струи происходит ударная ионизация бария и компонентов атмосферы. Через ~0,1 с после илжекции образуется плотный сгусток плазмы с концентрацией  $4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$  [14].

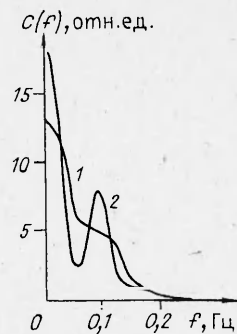
Определено, что степень ударной ионизации бария составляет  $10^{-1}$ . Движение кумулятивной струи и образующегося ударного фронта приводит к «выгребанию» компонентов атмосферы. В области за фронтом уменьшаются концентрации  $\text{O}^{\text{f}}$ ,  $\text{NO}^+$ ,  $\text{O}_2^+$  не менее чем в 3—5 раз, увеличивается концентрация  $\text{N}_2^+$  на порядок величины фона.

Наземные измерения с помощью модуляционного фотометра также выявили появление плазменного сгустка в течение  $\approx 0,5$  с после илжекции. Радиолокационное зондирование показало появление ионизованного сгустка с эффективной отражающей поверхностью  $\sim 1 \text{ км}^2$ .

Таким образом, в результате бортовых и наземных измерений определены основные характеристики начальной стадии движения струи, показано, что при кумулятивной илжекции в нижней поносфере образуется сгусток плотной плазмы, обладающей кинетической энергией. Движение такого сгустка аналогично появлению токового импульса. При илжекции под углом к геомагнитному полю можно ожидать возбуждения альфвеновских колебаний в силовой трубке, проходящей через область илжекции, и, как следствие, возможности стимулирования высыпания электронов радиационного пояса.

Рис. 6. Результаты статистической обработки показаний бортового счетчика Гейгера в эксперименте «Сполох-2».

1 — выборочный спектр мощности сигнала до инъекции бария; 2 — после инъекции.



Для обнаружения этого явления на борту установлен счетчик Гейгера, регистрирующий потоки электронов с энергией  $>40$  кэВ. Счетчиком Гейгера зафиксировано увеличение скорости счета на 20—30% через несколько миллисекунд после подрыва. Дальнейший анализ данных счетчика показал появление пульсаций с периодом  $\approx 11$  с в потоке высыпавшихся электронов (рис. 6). В основу анализа положено предварительное сглаживание временного ряда весовым скользящим осреднением с последующим расчетом выборочных спектров мощности сглаженных значений. Это позволило выявить указанную периодичность и определить время, в течение которого периодичность наблюдалась [15].

При проведении экспериментов «Сполох» большое внимание уделено вопросу измерения электрических полей в ионосфере по движению бариевой плазмы, образующейся после торможения кумулятивной струи. Установлено, что существующий критерий применимости бариевых облаков (малость возмущения) для регистрации электрических полей в ионосфере является неточным. Для корректного определения электрического поля необходимо учитывать соотношение концентраций фоновой и бариевой плазмы и проводить измерения электрических полей по движению бариевых облаков на стадии выравнивания концентраций облака и ионосферы.

В случае, когда концентрация инжектированной плазмы больше фоновой, существенно влияние возмущенного электрического поля на движение ионов. Оно приводит к тому, что дрейф ионов отсутствует и имеет место анизотропия амбиполярной диффузии в движущейся с ветром системе координат (облако ионов движется так же, как и облако нейтралей). На краю сгустка фоновое электрическое поле скомпенсировано не полностью, так что часть ионов и электронов имеет возможность дрейфовать в скрещенных полях и растекаться поперек и вдоль магнитного поля, образуя «рукава». Инжектированные ионы  $Ba^+$  вытекают в ионный «рукав», образуя «хвост», конец которого движется в возмущенном электрическом поле [16]. Таким образом, определение электрического поля по движению плотного ионного сгустка может привести к существенным ошибкам, особенно на начальной стадии эволюции плазменного образования.

Большой оптический материал, полученный во время двух экспериментов, обрабатывался с целью определения величины бариевого возмущения и исследования его эволюции. Для нахождения полного количества  $Ba$  проводилось фотометрирование негативов с помощью метода эквиденсит. Получено, что в экспериментах выбрасывалось  $6 \cdot 10^{23}$  атомов  $Ba$ , которые после фотоионизации образовывали облака плазмы с концентрацией  $\approx 5 \cdot 10^6$  ионов.

Поскольку концентрация плазменных сгустков в экспериментах существенно превышала фоновую, то их эволюция соответствовала изложенным физическим представлениям [17]. В течение достаточно долгого времени облака  $Ba^+$  двигались со скоростью ветра. Наблюдалось вытекание ионов  $Ba^+$  из этих сгустков и образование стратифицированных «хвостов». По движению облаков определены ветер, а по дрейфу



конца «хвоста» — электрические поля. Более подробная информация о взрывных инжекторах плазмы и результатах космофизических экспериментов «Сполох» содержится в [4, 14—29].

### Заключение

Проведенные в нашей стране и за рубежом эксперименты с инжекцией химических веществ с помощью взрывных инжекторов показали, что активные эксперименты есть мощное средство исследования космофизической среды. При этом инжекция различных веществ может использоваться не только для трассирования естественных процессов, но и для моделирования динамических явлений. Вместе с тем следует отметить, что возможности активных экспериментов в космических исследованиях, несмотря на накопленный опыт их проведения, наличие средств воздействия и диагностики физических явлений, используются недостаточно.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. З. Сагдеев, П. А. Жулин. Вестн. АН СССР, 1975, 12, 84.
2. G. Haerendel. Space. Res., 1973, XIII, 601.
3. K. W. Michel. Acta Astron., 1974, 1, 37.
4. Yu. Ya. Ruzhin, V. S. Skomarovsky, G. A. Shvetsov. Proc. XV Intern. Confer. on Phenomena in Ionized Gases. Minsk, 1981.
5. K. W. Michel. MPI-PAE/Extraterr., 1969, 19.
6. G. A. Shvetsov, V. M. Titov. 2-nd Intern. Confer. on Megagauss Field and Related Experiments. Washington, 1979.
7. G. Haerendel, R. Lüst.—In: Particles and Fields in the Magnetosphere.—Dordrecht: Reidel Publ. Co., 1970.
8. E. M. Wescott e. a. J. Geophys. Res., 1974, 79, 159.
9. E. M. Wescott e. a. Ibid., 1975, 80, 951.
10. G. Haerendel e. a. European Space Agency, SP115, 1976.
11. J. Heppner e. a. J. Geophys. Res., 1981, 86, 5, 3519.
12. G. Holmgren e. a. Ibid., 1980, 85, 10, 5043.
13. Yan e. a. J. Geophys. Res., 1986, 91, 5601.
14. П. А. Жулин, Г. П. Милиневский и др. Космические исследования, 1984, 22, 3, 406.
15. I. A. Zhulin, Yu. M. Zhuchenko e. a. Adv. Space Res., 1981, 1, 319.
16. N. I. Dzubenko, A. P. Zhilinsky e. a. Planet. Space Sci., 1983, 31, 8, 849.
17. L. A. Andreeva, I. S. Ivchenko e. a. Ibid., 1984, 32, 8, p. 1045.
18. И. С. Глова, Ю. Я. Ружин, Г. А. Швецов.—В кн.: Исследования по проблемам солнечно-земной физики. М.: Наука, 1975.
19. П. А. Жулин, В. М. Титов, Г. А. Швецов и др.—В кн.: Молекулярная газовая динамика. Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1980.
20. Ю. Я. Ружин, В. С. Скомаровский, Г. А. Швецов.—В кн.: Исследования по проблемам солнечно-земной физики. М.: Наука, 1979.
21. Ю. Я. Ружин, В. С. Скомаровский, Г. А. Швецов.—В кн.: Исследования космической плазмы. М.: Наука, 1980.
22. П. А. Стадниченко, В. М. Титов и др. ФГВ, 1982, 18, 3, 84.
23. Ю. Я. Ружин, В. С. Скомаровский.—В кн.: Физика ионосферы и магнитосферы. М.: ИЗМИРАН, 1978.
24. П. А. Жулин, Ю. М. Жученко и др. Геомагнетизм и астрономия, 1980, 20, 6, 1125.
25. Ю. Я. Ружин, В. С. Скомаровский.—В кн.: Физические процессы в ионосфере и магнитосфере. М., ИЗМИРАН, 1979.
26. В. С. Докукин, В. М. Костин и др.—В кн.: Исследование космической плазмы. М.: Наука, 1980.
27. И. С. Глова, Ю. Я. Ружин.—В кн.: Динамика космической плазмы. М.: Наука, 1976.
28. Р. И. Мойся и др. Вестник КГУ. Вып. 20. Киев: Киевский государственный университет, 1978.
29. Космические исследования, выполненные в СССР в 1978 году. М.: Наука, 1979.

*Поступила в редакцию 8/IX 1986*