

РАСЧЕТЫ ГАММА-ЗАРИ КОСМИЧЕСКОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА ОПЕРАЦИИ «МОРСКАЯ ЗВЕЗДА»

В. А. Жмайло, И. В. Соболев, А. Е. Широков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Описывается трехмерный расчет параметров области мощного космического ядерного взрыва операции «Морская звезда», проведенного США в 1962 г. Рассчитанные данные сравниваются с показаниями искусственного спутника Земли «Космос-5», характеризующими γ -зарю этого взрыва.

Ключевые слова: «Морская звезда», космический ядерный взрыв, γ -заря, разреженная плазма, магнитная газовая динамика, радиоактивные продукты взрыва, запаздывающее γ -излучение.

Введение

В 1962 г. в Тихом океане на высоте 400 км над островом Джонстон США произвели уникальный ядерный взрыв (ЯВ) мощностью 1400 кт ТНТ, который получил название «Морская звезда». Данный опыт сопровождался разнообразными физическими эффектами, некоторые из них не получили полного объяснения до настоящего времени.

Многие из эффектов этого взрыва как локального (в верхней атмосфере), так и глобального (в магнитосфере) характера, определяются процессами, происходящими при расширении образовавшегося при взрыве облака горячей плазмы в сравнительно холодной замагниченной плазме ионосферы. При этом ситуация существенно осложняется неоднородностью геомагнитного поля и плотности окружающей атмосферы.

Расчетное описание динамики продуктов ядерного взрыва «Морская звезда» на стадии его расширения уже было приведено авторами данной статьи в работе [1]. Полученные характеристики образующейся при разлете плазмы диамагнитной каверны хорошо соответствуют экспериментальным данным [2].

Однако научный и практический интерес так же представляет динамика нейтральной компоненты продуктов ядерного взрыва. Данная компонента образуется на стадии расширения облака взрыва

из-за эффекта перезарядки ионов продуктов ЯВ на частицах воздуха. В то время как плазма взрыва при разлете вверх удерживается геомагнитным полем, нейтральные частицы с ним не взаимодействуют и свободно разлетаются на большие расстояния от Земли.

Единственными измерениями, характеризующими такой разлет в первые секунды после ядерного взрыва «Морская звезда», являются измерения так называемой γ -зари искусственным орбитальным космическим спутником Земли «Космос-5».

Сразу после взрыва на его счетчике Гейгера был зарегистрирован резкий скачок темпа счета примерно на три порядка, который изображен на рис. 1, 2 [3, 4] (двузначность в начале измерений, показанных на рис. 2, объясняется особенностями работы счетчика [4]). Однако сигнал индикаторов электронов изменился незначительно, не более чем на 0,01 мкА. Соотношение показаний экранированного счетчика и индикаторов свидетельствует о большой жесткости излучения. При этом в момент взрыва спутник "Космос-5" находился в точке с координатами 44.9°N, 115.7°E на высоте 1442 км на расстоянии около 7500 км от района ЯВ вдоль дуги большого круга земного шара (см. рис. 1). На таком расстоянии от спутника зона прямой видимости расположена на высотах более 1200 км, и, следовательно, центр ЯВ на высоте 400 км, и даже верхняя граница облака плазмы после окончания

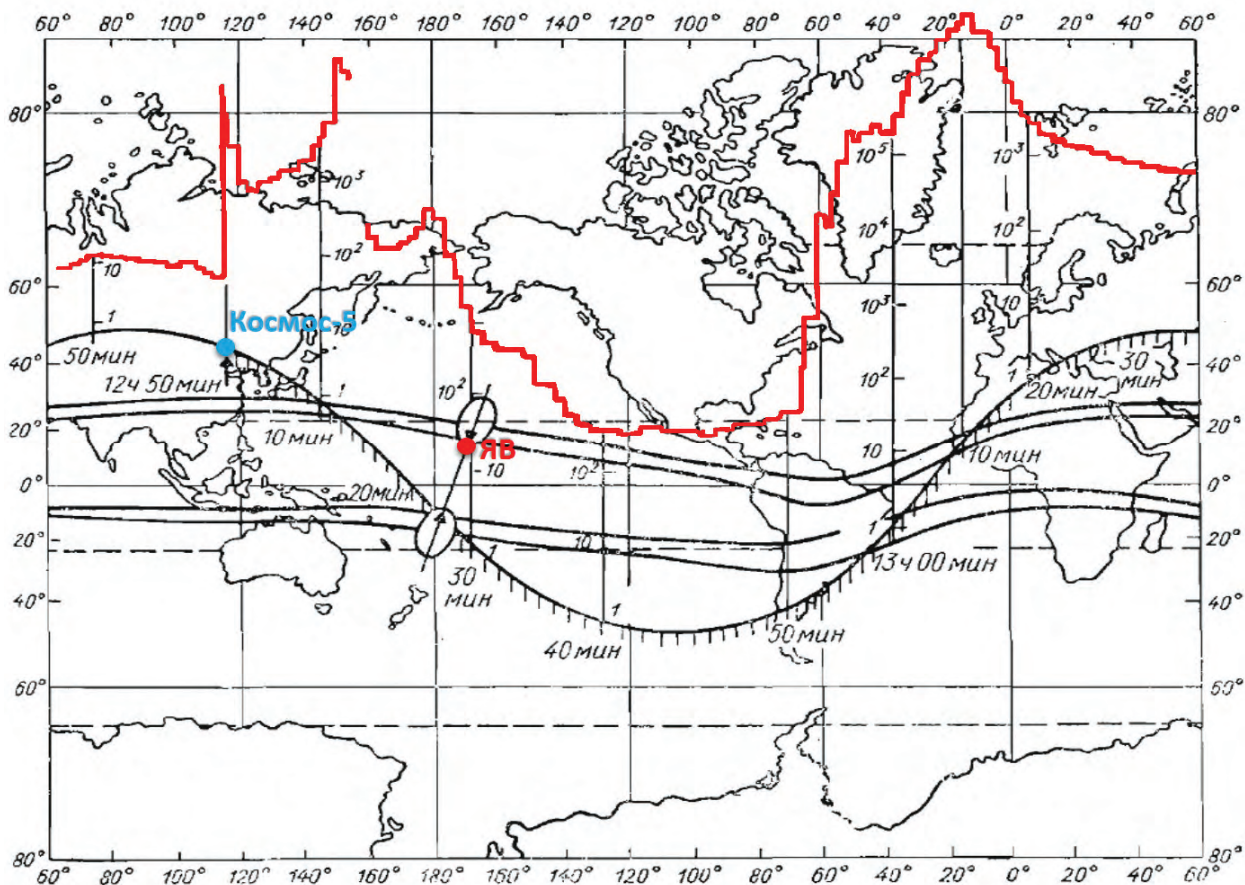


Рис. 1. Скорость счета счетчика Гейгера вдоль орбиты спутника «Космос-5» после ЯВ «Морская звезда»; на карте красным обозначена точка ЯВ, синим – положение спутника в момент ЯВ [3]

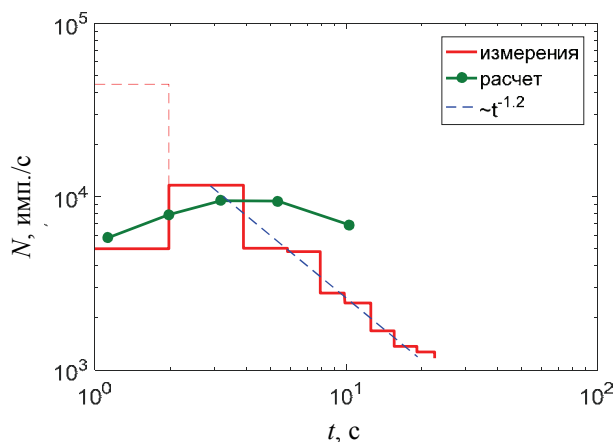


Рис. 2. Измеренные [3] и рассчитанные показания N [имп./с] счетчика Гейгера спутника «Космос-5» в зависимости от времени после ЯВ «Морская звезда»

его расширения с высоты спутника находилась глубоко под горизонтом.

Все это указывает на то, что наиболее вероятным источником γ -зари является запаздывающее γ -излучение радиоактивных продуктов ЯВ, поднявшихся на большие высоты (более 1200 км) и

попавших в область прямой видимости со спутника «Космос-5».

1. Расчетное моделирование динамики продуктов взрыва

Расчетно-теоретическое описание эффекта γ -зари требует в первую очередь трехмерного численного моделирования в глобальном масштабе магнитной газовой динамики облака взрыва с учетом его взаимодействия с неоднородными ионосферой и геомагнитным полем.

Наиболее строгая физическая модель, описывающая движение разреженной плазмы в магнитном поле для экспериментов такого типа, представляет собой систему кинетических уравнений Больцмана–Власова, дополненную уравнениями Максвелла. Однако численное решение такой системы уравнений представляет большие трудности, особенно в трехмерном случае. В работе [5] излагается другой подход, основанный на многопоточковом магнитогазодинамическом (МГД) прибли-

жении. В рамках данного подхода считается, что в рассматриваемом течении можно выделить несколько сортов частиц («потоков»). Движение каждого потока описывается уравнениями магнитной газовой динамики, между потоками происходят взаимодействия, обусловленные различными физическими механизмами. С использованием данного подхода в работе [5] проведен расчет некоторых физических эффектов, которые наблюдались в опыте «Морская звезда».

Дальнейшее развитие данной физической модели и соответствующей численной методики ТИМ описано в работах [6, 7].

Постановка описываемого расчета ЯВ операции «Морская звезда» (США, 1962 г.) с энерговыделением 1,4 Мт на высоте 400 км с географическими координатами эпицентра $16^{\circ}28'6.3''$, $169^{\circ}37'48.3''$ W подробно изложена в статье [1].

Однако глобальный масштаб динамики продуктов ЯВ дополнительно требует введения искривленной поверхности Земли, а также неоднородного геомагнитного поля. Это было учтено в расчете, результаты которого приводятся далее. Геомагнитное поле задается в виде поля точечного магнитного диполя, помещенного в центр Земли.

На рис. 3, 4 приведены соответствующие рассчитанные данные о пространственном распределении ионов и нейтралов продуктов ЯВ на моменты времени 1, 10 и 25 с после ЯВ. Центр системы координат расположен в точке ЯВ. Ось Ox (горизонтальная ось на рисунках) проходит через центр

Земли и направлена от него в точку ЯВ; ось Oy (вертикальная ось на рисунках) лежит в осевой плоскости Земли, т. е. является меридиональной. Положительное направление оси Oy – в сторону северного географического полюса.

На рис. 3 видно, что к моменту времени 1 секунда происходит заметный подъем облака ионов продуктов ЯВ и их растекание вдоль магнитного поля, происходит формирование струи ионов продуктов ЯВ, вытекающей из области взрыва вдоль силовых линий геомагнитного поля. Эта струя достигает сопряженной точки (СТ) геомагнитного поля и останавливается на высоте примерно 70 км над поверхностью Земли. Скорость движения конца струи к сопряженной точке составляет примерно 1500 км/с, что близко к скорости разлета продуктов ЯВ в пустоту с энергией 220 кт, что соответствует их кинетической энергии, которая остается после выхода рентгеновского излучения [2]. К моменту времени 10 с становится заметным возвратное движение ионов продуктов ЯВ из южной сопряженной точки на север. Этот эффект отмечается в комментариях к фотографиям светящейся области в опыте «Морская звезда» [8, 9]. По данным рисункам можно определить, что большая часть ионов продуктов ЯВ находится на геомагнитной оболочке с поперечным размером в районе экватора, соответствующим там ширине струи ионов продуктов ЯВ в радиальном направлении и равным около 500 км. Примерно такой же размер струи в долготном направлении.

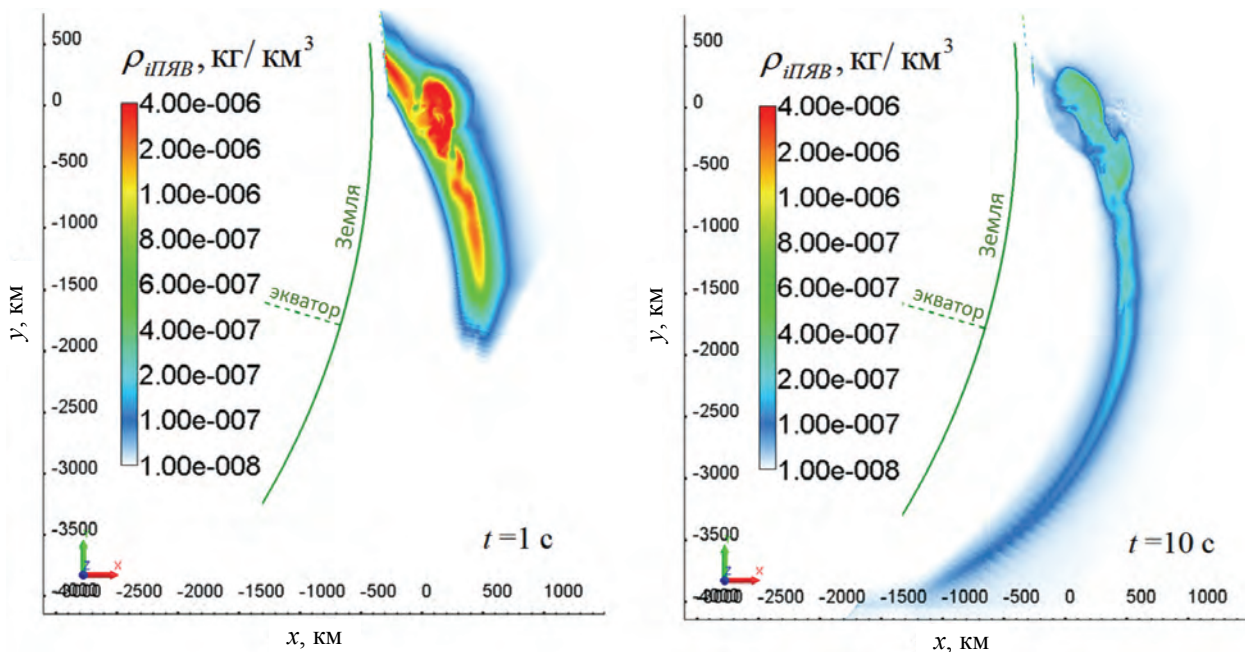


Рис. 3. Плотность ионов продуктов ЯВ в плоскости Oxy в моменты времени 1 и 10 с после ЯВ «Морская звезда»

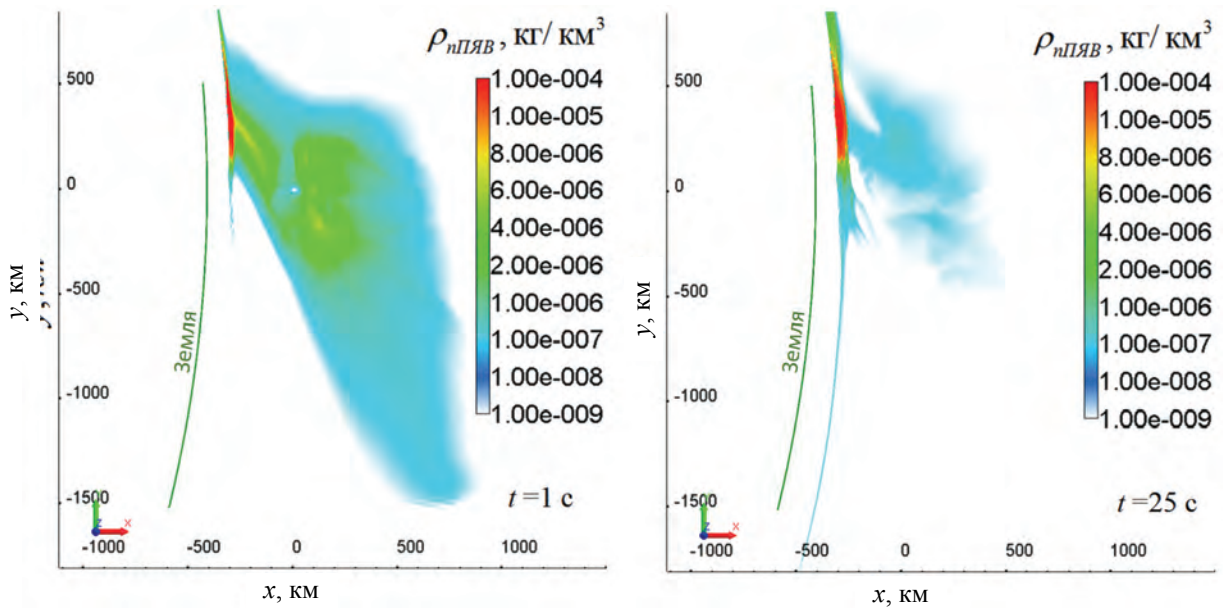


Рис. 4. Плотность нейтралов продуктов ЯВ в плоскости Oxz в моменты времени 1 и 25 с после ЯВ «Морская звезда»

Пространственное распределение нейтральных частиц продуктов ЯВ оказывается более диффузным, чем заряженных. Нейтралы продуктов ЯВ образуются из ионов продуктов ЯВ в результате перезарядки. Значительная часть нейтралов в виде полушара, имеющего скорость внешней границы ~ 500 км/с, почти свободно уходит из области взрыва вверх на глобальные расстояния. Как видно, на рис. 4 на момент времени 1 с после ЯВ вблизи центра ЯВ они сосредоточены в двух областях. Одна из них выше точки взрыва. Другая область ориентирована по силовым линиям, направленным в сопряженную точку.

На рис. 4 заметно, что корреляция формы этой области с направлением поля к моменту времени 3 с после ЯВ слабее, чем для ионов. Нижняя граница нейтралов продуктов ЯВ расположена на той же высоте (70 км над Землей). Как и на фотографиях светящейся области ЯВ «Морская звезда» [9], граница области продуктов ЯВ имеет сильно нерегулярный вид (множество лучей).

Со временем (см. рис. 4) плотность нейтралов продуктов ЯВ вблизи области взрыва заметно падает в основном в результате их разлета.

2. Расчетное описание γ -зари

На основе результатов расчетов магнитной гравитационной динамики ЯВ были рассчитаны соответствующие показания счетчика Гейгера, обеспечиваемые γ -излучением радиоактивных продуктов

ЯВ. При этом использовались следующие предположения:

- однородное распределение радиоактивных осколков деления среди продуктов ЯВ;

- горизонт (граница прямой видимости) для γ -излучения со спутника «Космос-5» имеет высоту 65 км, т. е. γ -излучение, попавшее на меньшие высоты, поглощается и не вносит вклад в показания счетчика Гейгера [3];

- пренебрегается рассеянием и поглощением γ -излучения на больших высотах.

Применялась следующая формула:

$$\frac{dN}{dt} [\text{имп./с}] = \frac{k_N}{4\pi} \int \frac{Rf(t)\rho_{\text{ПЯВ}}(\mathbf{r},t)\chi(\mathbf{r})}{(r_C - r)^2} d^3\mathbf{r},$$

где $R = 4 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{МэВ}$ – чувствительность детектора; $f(t)$ – мощность энергии запаздывающего γ -излучения радиоактивных осколков одного атома ^{235}U (см. рис. 5 [10]); $\rho_{\text{ПЯВ}}(\mathbf{r},t)$ – плотность продуктов ЯВ;

$\chi(\mathbf{r}) = 1$, если на отрезке $(\mathbf{r}_C, \mathbf{r})$ все точки лежат выше высоты 65 км, в противном случае $\chi(\mathbf{r}) = 0$; \mathbf{r}_C – радиус-вектор положения спутника;

$k_N = \frac{\alpha_{\text{дел}} Q_{\text{ЯВ}}}{m_{\text{ПЯВ}} Q_a} = 1,26 \cdot 10^{23}$; $m_{\text{ПЯВ}} = 1000$ кг – масса продуктов ЯВ; $Q_{\text{ЯВ}} = 1,4$ Мт – энергия ЯВ;

$Q_a = 202$ МэВ – энергия деления одного ядра ^{235}U , $\alpha_{\text{дел}} = 0,7$ – доля энерговыделения ЯВ, обеспечиваемая реакциями деления [11].

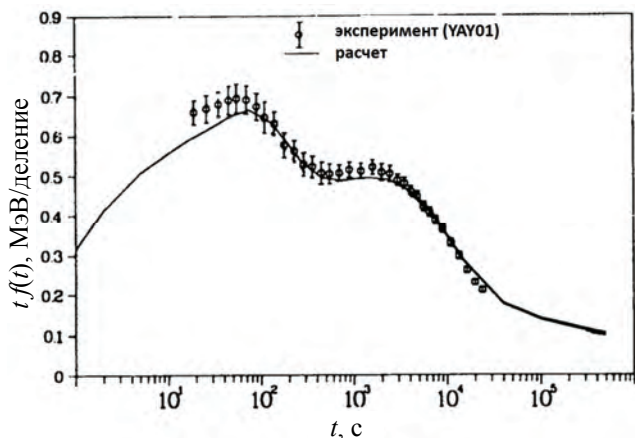


Рис. 5. Мощность энергии f [МэВ/с], умноженная на время t [с], запаздывающего γ -излучения радиоактивных осколков атома ^{235}U (расчетные и экспериментальные данные) [10]

На рис. 2 изображены измеренные показания счетчика Гейгера спутника «Космос-5» в зависимости от времени [3, 4]. Дополнительно в виде красной кривой приводятся соответствующие данные, рассчитанные выше представленным способом, исходя из результатов расчета динамики продуктов ЯВ. Также на рисунке показана зависимость, соответствующая интенсивности испускаемых γ -квантов продуктами ЯВ, которая примерно $\sim t^{-1,2}$ [10]. Наблюдается хорошее на фоне сделанных грубых допущений и имеющихся неопределенностей согласие расчетной и экспериментальной кривых в пределах 3 раз, которое качественно подтверждает разлет значительной доли продуктов ЯВ в виде нейтральной компоненты на большие расстояния от точки взрыва.

Выводы

В целом по результатам проведенных расчетов можно заключить, что запаздывающее γ -излучение радиоактивных продуктов ЯВ «Морская звезда», поднявшихся на большие высоты (более 1200 км) и попавших в область прямой видимости со спутника «Космос 5», является источником скачка темпа счета в показаниях счетчика Гейгера данного спутника в первые секунды-минуту после ЯВ.

Вычисление данных показаний на временах более 10 секунд после ЯВ требует дополнительных расчетов с существенно расширенной расчетной областью или введения упрощенной модели динамики нейтральной компоненты продуктов ЯВ. Также эти данные могут быть уточнены с помощью

детального расчета ослабления и рассеивания γ -излучения атмосферой, например, методом Монте-Карло.

Список литературы

1. Залялов А. Н., Жмайло В. А., Широков А. Е. и др. Расчеты магнитного поля и потоков β -электронов в области взрыва операции «Морская звезда» // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Теоретическая и прикладная физика. 2012. Вып. 3. С. 49–71.
2. Dyal P. Particle and field measurements of the Starfish diamagnetic cavity // J. of Geophys. Res. 2006. Vol. 111.
3. Хесс В. Радиационный пояс и магнитосфера. М.: Атомиздат, 1972.
4. Гальперин Ю. И., Болунова А. Д. // Космические исследования 2. 1964. № 5. С. 763.
5. Жмайло В. А., Анисина И. М. и др. Физические эффекты ядерного взрыва в операции «Морская звезда» // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2008. Т. 13. С. 16–37.
6. Соболев И. В. Многомерные методики решения задач многопоточковой газодинамики в переменных Эйлера на неструктурированных сетках // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование». Саратов, 2011.
7. Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А., Новиков И. Г., Соболев И. В., Ялозо А. В. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып.3. С. 37–52.
8. Операция «Морская Звезда». Сборник статей. М.: Атомиздат, 1964.
9. United States high-altitude test experiences. A review emphasizing the impact on the environment: Monograph / LANL; Hoerlin H.; LA-6405. Los Alamos, New Mexico, 1976.
10. Test of Pre-ENDF/B-VI Decay Data and Fission Yields: report / Los Alamos National Laboratory; G. Rudstam, T. R. England; LA-11909-MS. Los Alamos, New Mexico, 1990.
11. Improvement of Specter II Code: Injection and Evolution of an Artificial Radiation Belt: Report / Lockheed Palo Alto Research Laboratory / Space Science Laboratory; J. B. Cladis, G. T. Davidson, W. E. Francis, et al.; AFWL-TR-78-236. Palo Alto, CA, 1979.

Статья поступила в редакцию 24.12.2019