

УДК 662.413 : 546.34 : 546.43

СОЗДАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ОБЛАКОВ ПАРООБРАЗНЫХ ЩЕЛОЧНЫХ И ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2012 А.И. Дробыжев,¹ А.А. Мокров, И.К. Кукушкин, А.М. Пыжов,
В.А. Рекшинский,² П.П. Пурыгин³

В данной статье представлены результаты многолетних исследований по разработке и натурным испытаниям устройств для создания сферических облаков из паров щелочных и щелочноземельных металлов в верхних слоях атмосферы Земли.

Ключевые слова: азиды щелочных и щелочноземельных металлов, пиротехнические составы, генераторы паров металлов, натурные испытания, искусственные светящиеся сферические облака лития и бария.

Введение

В последнее время для исследования верхней атмосферы стал широко применяться метод искусственных светящихся облаков (ИСО). Суть метода сводится к наблюдениям оптических эффектов, возникающих при выбросе в атмосферу с помощью метеорологических ракет определенных химических веществ. Одним из направлений в развитии подобных экспериментов является использование ИСО в качестве зонда для изучения ионосферных и магнитосферных электрических полей и геомагнитного поля Земли.

Вещества, используемые для создания искусственных образований, должны удовлетворять нескольким требованиям. Прежде всего, они должны легко испаряться и легко ионизироваться под действием ультрафиолетового излучения солнца. Кроме того, выброшенные вещества должны давать излучение в видимом диапазоне спектра, в этом случае ИСО можно будет наблюдать с поверхности Земли с помощью оптических приборов. В дальнейшем было показано, что более всего

¹Дробыжев Анатолий Иванович (purygin2002@mail.ru), кафедра физвоспитания и спорта Самарского государственного технического университета, 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

²Мокров Александр Александрович (a2mokrov@mail.ru), Кукушкин Иван Куприянович (prof_kik@mail.ru), Пыжов Александр Михайлович (argel33@mail.ru), Рекшинский Владимир Андреевич (var_xtoca@mail.ru), кафедра химии и технологии органических соединений азота Самарского государственного технического университета, 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

³Пурыгин Петр Петрович (purygin2002@mail.ru), кафедра органической, биоорганической и медицинской химии Самарского государственного университета, 443011, Российская Федерация, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

для этих целей подходят щелочные и щелочноземельные металлы. На рис. 1 приведена схема образования ИСО.

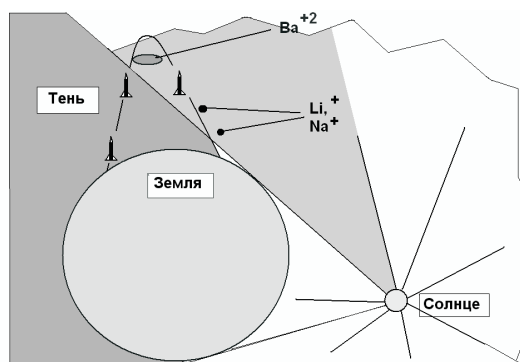
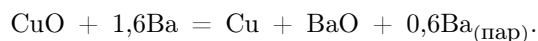


Рис. 1. Схема образования ИСО

1. Разработка рецептур пиротехнических составов для генерации парообразных металлов в верхних слоях атмосферы Земли

В настоящее время для создания ИСО используют способы, основанные на образовании облаков парообразных металлов с помощью кумулятивных зарядов и при горении пиротехнических составов. В первом случае под действием ударной волны, генерируемой зарядом взрывчатого вещества, происходит испарение металла и его ускорение до больших скоростей (более 10 км/с). Такой способ, например, был использован для выброса струи парообразного бария с борта ракеты в верхних слоях атмосферы Земли [1]. Однако такой способ создания ИСО наиболее рационально использовать для изучения магнитосферы и геомагнитных полей Земли, поскольку выбрасываемые пары металла формируются только в виде струи.

Другими известными способами образования паров щелочноземельного металла являются способы, основанные на горении термитных составов, одним из компонентов которых служит металл-парообразователь или его соединение с кислородом. Таким образом, например, получали пары бария по следующей химической реакции [2]:



Однако пиротехнический состав, использованный в этом случае, имеет ряд существенных недостатков. Наиболее важным из них является низкий выход паров бария — около 11 %. Другим недостатком указанного состава является наличие в нем металлического бария, который обладает высокой химической активностью, особенно по отношению к кислороду и воде. Это приводит к повышенной пожароопасности и необходимости изготовления, применения и хранения состава и зарядов на его основе в атмосфере инертного газа, например, в аргоне.

Подобным образом было создано ИСО парообразных щелочных металлов, испаряемых в процессе горения высокотемпературного термитного состава [3]. В СССР

в 1958 г. И.С. Шкловский и В.Г. Курт провели эксперимент по созданию натриевого облака на высоте 430 км с помощью метеоракеты. Для испарения металлического натрия использовался железоалюминиевый термит. Натрий дробился на небольшие кусочки, смешивался с термитом, и вся смесь помещалась в стальной корпус. При горении термита натрий испарялся, и пары его выбрасывались в атмосферу. Принимая во внимание достаточно высокую температуру горения подобных термитов (около 2000 °С) и сравнительно низкую температуру кипения металлического натрия (около 880 °С), можно предположить, что выход паров металла в этом эксперименте был достаточно велик. С помощью этого метода создания ИСО впервые была определена плотность атмосферы на этой высоте. Плотность вычислялась по значению коэффициента молекулярной диффузии, определяемого из последовательных снимков облака, с использованием модельных значений температуры.

В дальнейшем аналогичный метод применялся для определения плотности верхних слоев атмосферы путем одновременных измерений коэффициента молекулярной диффузии и температуры атмосферы по наблюдениям ИСО.

Подобный способ создания ИСО наряду с достаточным выходом паров натрия имеет ряд существенных недостатков. К сожалению, авторами не были приведены данные по чистоте паров натрия, но, вероятно, данный метод не позволяет получать натриевые пары достаточно высокой чистоты. Кроме того, невысокая скорость горения термитного состава (несколько миллиметров в секунду) не может обеспечить формирование сферического облака паров металлов, динамика изменения формы которого позволяет получить больше информации о процессах, происходящих в атмосфере, в отличие от облаков вытянутой формы.

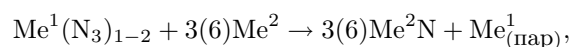
В связи с этим нами была поставлена задача разработки нового способа создания искусственных светящихся облаков из паров щелочных и щелочноземельных металлов и устройства для генерации этих паров с выходом, соответствующим уровню натриевого генератора, но лишённого его недостатков.

В основу выбора пиротехнического состава для генерации паров щелочных и щелочноземельных металлов были положены следующие принципы:

- чистота получаемых паров;
- максимальный удельный выход паров испаряемого металла;
- определенная (оптимальная) температура горения состава.

Согласно этим принципам применение пиротехнических составов на основе кислородсодержащих окислителей для генерации паров металлов нежелательно. Это вызвано тем, что при горении подобных составов наряду с образованием паров испаряемых металлов образуется мелкодисперсный оксид испаряемого металла или металла-горючего в виде белого дыма, что ведет к загрязнению ИСО. Поэтому составы, применяемые для генерации паров металлов, должны в результате горения образовывать пары металлов и твердые компактные шлаки.

Дальнейший поиск возможных компонентов пиротехнических составов, пригодных для генерации паров металлов, показал, что наиболее целесообразно для этих целей использовать азиды металлов, участие которых в процессе горения происходит в соответствии со следующим уравнением:



где Me^1 — Li, Na, K, Rb, Cs, Ca, Sr, Ba; Me^2 — Ti, B, Al, Be, Si, Zr, Hf, V, Nb, Ta.

Азиды в данных реакциях служат окислителем и одновременно поставщиком паробразных металлов (Me^1), а металлы (Me^2) — горючим. При своем распаде азиды выделяют азот в активном состоянии, что облегчает его взаимодействие с

бором, алюминием и переходными металлами IV и V групп периодической системы элементов с образованием соответствующих тугоплавких нитридов. За счет высокой теплоты горения образующиеся щелочные и щелочноземельные металлы выделяются в парообразном состоянии, а тугоплавкие нитриды металлов остаются в виде компактного твердого остатка. Следовательно, пары металлов получаются без загрязнений посторонними примесями, что немаловажно. Кроме того, генерация паров металлов происходит за счет разложения соответствующего азида, что является дополнительным фактором повышения чистоты и выхода металлов в парообразном состоянии.

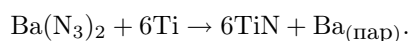
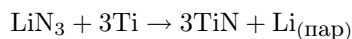
Дальнейший отбор систем, пригодных к практическому использованию, осуществлялся после оценки максимальных температур, развивающихся в процессе их горения. Согласно принципам отбора составов для генерации паров металлов заслуживали внимание те системы, у которых температура горения была выше температуры кипения испаряемого металла (Me^1), но ниже температуры разложения соответствующего нитрида металла (Me^2), т. е. должно соблюдаться условие:

$$T_{\text{кип.}M^1} < T_{\text{г.}} < T_{\text{разл.}M^2}.$$

Исходя из этого условия было показано, что для испарения щелочных и щелочноземельных металлов наиболее рационально использовать пиротехнические составы, состоящие из титана (Me^2) и соответствующего азида металла (Me^1). Составы на основе титана, кроме того, имеют высокое содержание испаряемого металла. Титан доступен и относительно дешев.

В последующих исследованиях более подробно изучали составы, генерирующие пары бария и лития, для которых были определены зависимости выхода паров металлов от плотности состава, дисперсности и соотношения компонентов, давления. Данные зависимости определяли экспериментально, путем сжигания образцов пиротехнических составов в "бомбе постоянного давления" с последующим химическим анализом продуктов сгорания. Как и следовало ожидать, с повышением давления температура кипения испаряемых металлов возрастала. Поэтому выход паров металлов зависел от давления, которое развивается при работе генератора. При этом был определен оптимальный интервал изменения величины давления, обеспечивающий максимальный выход паров металла. Он оказался равным 20–40 атм.

В результате проведенных исследований были разработаны высокоэффективные составы для генерации паров щелочных и щелочноземельных металлов — лития и бария, состоящие из стехиометрической смеси азидов соответствующих металлов с титаном. Получение паров лития и бария описывается следующими уравнениями:



Выход испаряемых металлов при горении разработанных составов достигал более 99 %.

Теоретическая оценка по тепловым эффектам сгорания и температурам кипения соответствующих металлов показала термодинамическую возможность создания аналогичных составов для генерации паров других щелочных и щелочноземельных металлов (натрия, калия, рубидия, цезия, стронция и кальция). Проведенные в дальнейшем лабораторные исследования подтвердили это предположение.

2. Разработка устройств для создания ИСО паров щелочных и щелочноземельных металлов в верхних слоях атмосферы Земли

Следующим этапом в создании нового способа образования ИСО был этап разработки устройств для размещения пиротехнического состава, генерирующего пары металлов. Авторами была поставлена задача создания надежных, безопасных и высокоэффективных устройств для генерации и быстрого выброса в верхние слои атмосферы Земли паров щелочных и щелочноземельных металлов.

При разработке конструкций устройств для генерации паров щелочных и щелочноземельных металлов авторы ориентировались на применение в них азидосодержащих пиротехнических составов и руководствовались требованиями технического задания организации-заказчика. В соответствии с ними одно из устройств должно создавать облако паров лития сферической формы в количестве $6 \cdot 10^{22}$ атомов лития в течение не более 0,5 с, а другое — облако паров бария — $1-3 \cdot 10^{24}$ атомов бария в течение не более 1,5 с.

Согласно этим условиям были определены массы азидосодержащих составов и габариты соответствующих устройств. Для герметизации и поддержания оптимального давления внутри устройств во время их работы были применены алюминиевые мембраны и молибденовые диафрагмы, размеры которых подбирались экспериментально. Необходимое время выброса паров металлов из устройств было достигнуто за счет увеличения поверхности зажигания блоков основного пиротехнического состава, конфигурация которых также подбиралась экспериментально.

В результате были разработаны два варианта устройств с разным содержанием испаряемого металла и с различным расположением воспламенительного состава, применяемого для зажигания блока азидосодержащего пиротехнического состава. В одном случае воспламенительный состав располагался на наружной поверхности прессованного блока азидосодержащего состава, а в другом — внутри, в его каналах, сформированных в блоке.

Вариант № 1 разработанного устройства содержал от 1 до 5 г испаряемого металла. Воспламенение блока азидосодержащего пиротехнического состава производилось с его боковой наружной поверхности.

Технические характеристики одного из устройств варианта № 1:

- устройство предназначено для генерации паров лития;
- масса устройства — 727 ± 5 г;
- масса основного состава — 36 г;
- масса лития в составе 1,40 г;
- полное время работы устройства — не более 2 с;
- максимальное давление в устройстве — не более 50 атм;
- габаритные размеры устройства — 45×119 мм.

Вариант № 2 устройства содержал от от 300 до 600 г испаряемого металла. Воспламенение блока азидосодержащего пиротехнического состава производилось изнутри. Для этого в блоке азидосодержащего состава были сформированы каналы, в которые помещался воспламенительный состав.

Технические характеристики одного из устройств варианта № 2:

- устройство предназначено для генерации паров бария;
- масса устройства — 5900 ± 50 г;
- масса основного состава — 1900 ± 20 г;
- масса бария в составе — 519 ± 5 г;

- полное время работы устройства — не более 3 с;
- максимальное давление в устройстве — не более 100 атм.
- габаритные размеры устройства — 100 × 330 мм.

Внешний вид устройств для создания ИСО сферической формы в верхних слоях атмосферы Земли приведен на рис. 2.



Рис. 2. Устройства для генерации паров металлов:

1 — вариант № 1 — устройство для генерации паров лития; 2 — вариант № 2 — устройство для генерации паров бария

Устройства работают следующим образом.

При подаче импульса тока напряжением 27 В с бортового блока питания метеоракеты по команде временного механизма на пиропатрон устройства происходит его срабатывание. После этого форс пламени поджигает воспламенительный состав, который, в свою очередь, воспламеняет основной пиротехнический заряд.

В результате горения основного заряда давление в контейнере возрастает до определенного значения, происходит разрыв алюминиевой мембраны, и пары металла выбрасываются в атмосферу. Величина диаметра выхлопного сопла была подобрана таким образом, чтобы в процессе горения блока пиротехнического состава внутри устройства поддерживалось давление 2–4 МПа (20–40 атм).

В течение ряда лет Обнинским Институтом экспериментальной метеорологии (ИЭМ) (НПО "Тайфун") проводились натурные испытания устройств для генерации паров лития и бария. Искусственные светящиеся облака создавались с целью исследования физических процессов, протекающих в верхних слоях атмосферы Земли: диффузионные процессы, турбулентность, ветер, температура, динамика магнитно-силового поля Земли. Устройства устанавливались на метеорологические ракеты МР-12, пуски которых, например, в период с 1979 по 1980 г. производились на станциях ракетного зондирования, расположенных в Волгограде (48°41' с. ш., 44°21' в. д.) и на острове Хейса (Архипелаг Земля Франца-Иосифа) (80°37' с. ш., 58°03' в. д.). В дальнейшем сотрудники кафедры ХТОСА СамГТУ принимали участие в экспериментах по изучению атмосферы Земли с помощью ИСО в тропических широтах, где пуски ракет проводились с научно-исследовательских судов "Профессор Визе" и "Профессор Зубов".

В ноябре–декабре 1980 г. состоялась комплексная международная экспедиция на полярную станцию на острове Хейса [4]. Частью программы исследований было создание искусственных светящихся и ионизированных облаков на высотах до 180 км. Это осуществлялось путем выброса паров металлов бария и лития из компактных устройств, конструкция которых была разработана сотрудниками кафедры ХТОСА. Регистрация динамики перемещения и изменения ИСО со временем проводилась с помощью аэрофотокамер. Масса устройств для генерации паров

бария и лития составляла около 6000 г и 700 г, масса составов в них — 1900 г и 38 г, а масса испаряемых металлов — 570 г и 1,4 г соответственно. По истечении 5–10 с, прошедших после работы устройств, были образованы сферические облака паров бария и лития диаметром около 15–25 км и 3–5 км соответственно. Цвет бариевого облака по мере его ионизации лучами Солнца становился интенсивно зеленым, а литиевого облака — оранжевым. В дальнейшем наблюдалось очень быстрое отделение ионизированной компоненты бариевого облака, ее вытягивание до длины в 50 км и перемещение к полюсу Земли, что подтверждало высокую чистоту паров металлов. Время жизни облаков составляло от 10 до 30 мин, все это обеспечивало высокую эффективность эксперимента в целом.

На рис. 3 изображен приборный отсек метеоракеты МР-12 с установленными контейнерами для генерации паров лития.

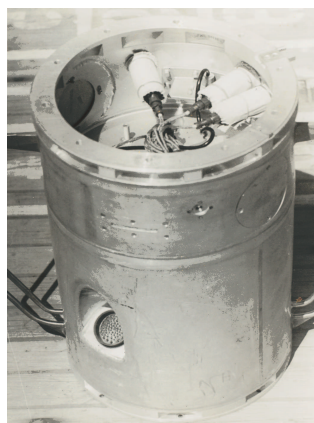


Рис. 3. Приборный отсек метеоракеты МР-12 с установленными генераторами паров лития

Таким образом, в результате проведенных исследований были разработаны пиротехнические составы и конструкции устройств, позволяющие получать пары бария и лития в виде сферических облаков со временем жизни, достаточным для определения динамических характеристик верхних слоев атмосферы. Многочисленные исследования, проведенные сотрудниками Института экспериментальной метеорологии совместно с сотрудниками кафедры ХТОСА СамГТУ, в средних, полярных и тропических широтах Земли подтвердили высокие надежность и эффективность разработанных генераторов ИСО паров металлов.

Подобные эксперименты по созданию ИСО в космосе проводились и в других развитых странах мира [5]. Так, например, 27 декабря 1984 года над Тихим океаном был проведен совместный эксперимент "Ampte" США, Англией и ФРГ. В ходе эксперимента создавались бариевые и литиевые облака. Так называемая "Комета" имела центральное ядро и хвост, расширяющийся со скоростью до 800 м/с. Через несколько минут после возникновения хвост приобрел неправильную форму с ясно видимыми "волнами плотности" протяженностью до десятков километров. Эти "волны" воспринимались наблюдателями как разноцветные концентрические дуги или окружности. Весь небесный фейерверк занял около 10 мин. Однако данные ИСО обладали более низкими характеристиками, чем ИСО, полученные в отечественных экспериментах еще в 1980 г.

Эксперименты по созданию ИСО в верхних слоях атмосферы Земли актуальны и в настоящее время. Со 2 по 20 июля 1999 года NASA производилась серия пусков геофизических ракет с космодрома Wallops Island [5]. При помощи двухступенчатой ракеты "Taurus-Orion" на высоте от 69 до 154 км производился выброс триметилалюминия для создания искусственного облака. Созданные искусственные облака были заметны на большом расстоянии.

В настоящее время Россия продолжает занимать лидирующее положение в мире по разработке генераторов ИСО, однако, в отличие от нашей страны, за рубежом подобным исследованиям уделяется все большее внимание.

Литература

- [1] Скомаровский В.С. Эффекты кумулятивной инъекции бария в нижней ионосфере: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1981. 149 с.
- [2] Подгорный И.М. Активные эксперименты в космосе. М.: Знание, 1974. 7 с.
- [3] Шидловский А.А. Основы пиротехники. М: Машиностроение, 1964. С. 294–295.
- [4] Разработка контейнеров для образования искусственных светящихся облаков в верхней атмосфере: отчет о НИР, № Г.Р. 80012040. Куйбышев: КПТИ, 1980. 29 с.
- [5] URL:<http://scorpicora1.narod.ru/astronomia/raznoe5.html>.

Поступила в редакцию 13/III/2012;
в окончательном варианте — 13/III/2012.

CREATION OF ARTIFICIAL CLOUDS OF ALKALINE AND ALKALINE EARTH METALS AZIDES IN THE UPPER ATMOSPHERE

© 2012 A.I. Drobyzhev, A.A. Mokrov, I.K. Kukushkin, A.M. Pyzhov, V.A. Rekshinskiy, P.P. Purygin⁴

The results of longstanding investigation of developing and natural testing of devices for the spherical clouds creation from vaporized alkaline and alkaline earth metals azides in the upper earth atmosphere are given in the following article.

Key words: alkaline and alkaline earth metals azides, pyrotechnic compounds, fume metal generators, natural testing, artificial lightning spherical lithium and barium clouds.

Paper received 13/III/2012.

Paper accepted 13/III/2012.

⁴Drobyzhev Anatoliy Ivanovich (purygin2002@mail.ru), the Dept. of Physical Education, Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation; Mokrov Alexander Alexandrovich (a2morkrov@mail.ru), Kukushkin Ivan Kupriyanovich, Pyzhov Alexander Mihailovich (arge133@mail.ru), Rekshinskiy Vladimir Andreevich (var_xtoca@mail.ru), the Dept. of Chemistry and Technology of Organic Compounds of Nitrogen, Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation; Purygin Pyotr Petrovich (purygin2002@mail.ru), the Dept. of Organic, Bioorganic and Medicinal Chemistry, Samara State University, Samara, 443011, Russian Federation.