

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 537.525.99, 551.594.9

Гипотеза о транзиентных световых явлениях в мезосфере Венеры

Э.А. Соснин^{✉1,2}, В.А. Панарин¹, В.С. Скакун¹, Д.А. Сорокин^{1,2*}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 24.02.2025;
после доработки 07.03.2025;
принята к печати 12.03.2025

Наблюдения за состоянием мезосферы Венеры с космических аппаратов пока не выявили транзиентных световых явлений, аналогичных транзиентам, наблюдаемым в атмосфере Земли. В данной работе возможность формирования таких явлений доказывается в лабораторных условиях. Для этого проведен эксперимент по формированию апокампов в углекислом газе при различном давлении. Полученные данные экспериментально подтверждают гипотезу о том, что условия на высотах, соответствующих верхнему краю облачности в атмосфере Венеры, благоприятны для формирования аналогов транзиентов мезосферы Земли. На основе этого выработаны рекомендации по проектированию систем детектирования таких явлений с орбитальных спутников или аэростатов.

Ключевые слова: апокампиский разряд, мезосфера Венеры, транзиентные световые явления, спектральная аппаратура; apokamp discharge, Venus mesosphere, transient light event, spectral equipment.

Введение

Для изучения транзиентных световых явлений (ТСЯ, или транзиенты) в атмосфере Земли применяются три подхода: 1) наблюдения с поверхности Земли, с воздушных летательных аппаратов и из космоса; 2) эксперименты с лабораторными электрическими разрядами; 3) теоретическое моделирование. Эти подходы дополняют друг друга [1–4].

В отдельном цикле работ нами ранее было показано, что лабораторным аналогом транзиентов средней атмосферы Земли является апокамп, если его сформировать в условиях, близких к условиям возникновения атмосферных транзиентов [4–7]. Апокамп (от греческого $\alpha\lambda\omicron$ «от» и $\kappa\alpha\mu\pi\eta$ «изгиб») — это узкая светящаяся структура, стример, стартующий от места изгиба плазменного канала высоковольтного импульсно-периодического разряда, находящегося под положительным потенциалом. В атмосфере, как мы полагаем, аналогично формируются три вида транзиентов: голубые струи, стартеры и гигантские струи (от англ. blue jets, blue starters и gigantic jets), которые развиваются с вершины положительно заряженного грозового

облака после того, как происходит внутриоблачный разряд [1, 7, 8].

Цель настоящей работы — экспериментально проверить гипотезу о том, что аналоги указанных транзиентов могут формироваться в атмосфере Венеры. Для этого будет использоваться методология, сформированная нами в цикле экспериментов с апокамписким разрядом [4–7].

Несмотря на активизацию наблюдений за состоянием атмосферы Венеры с космических аппаратов, явления, аналогичные голубым струям и стартерам в верхних слоях атмосферы Земли, обнаружены не были [9]. Мы полагаем, что эксперименты с лабораторными моделями позволят сделать полезные уточнения о том, на каких высотах искать эти аналоги и какую спектральную аппаратуру выбрать для их надежного детектирования.

Материалы и методы

Лабораторное моделирование условий формирования аналогов транзиентов проводили на установке, показанной на рис. 1. Разряд формировали в цилиндрической кварцевой колбе 1 (внутренний диаметр 52 мм, высота 20 см) между заостренными стальными электродами 2 и 3 (диаметр 2,5 мм), расположенными на расстоянии $d = 7$ мм друг от друга и образующими угол 15° .

* Эдуард Анатольевич Соснин (badik@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Александрович Панарин (panarin@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Семенович Скакун (skakun@loi.hcei.tsc.ru); Дмитрий Алексеевич Сорокин (SDmA-70@loi.hcei.tsc.ru).

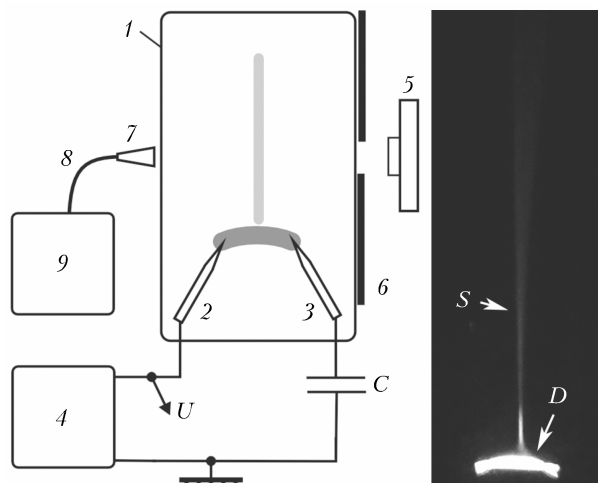


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки (слева) и интегральная фотография свечения апокампиического разряда при давлении углекислого газа 60 торр (справа): 1 — колба; 2, 3 — электроды из нержавеющей стали; 4 — источник питания; 5 — фотоприемник; 6 — диафрагма; 7 — линза; 8 — оптоволоконный световод; 9 — спектрометр; D — канал разряда, находящийся под плавающим потенциалом; S — стример (апокамп), «прорастающий» от канала

Из нескольких серий измерений известно, что CO_2 — основная составляющая атмосферы Венеры (~96–97%), а вторым по долевному содержанию является молекулярный азот (от 3,5 до 5,4%) [10, 11]. Поэтому в ходе экспериментов колба 1 заполнялась углекислым газом чистотой 99,8% («ТомПромГаз»), причем давление CO_2 варьировалось от 760 до 1 торр. В отдельных случаях колбу 1 заполняли воздухом, о чем будет сказано далее. Изменяя давление в колбе 1, можно было имитировать условия зажигания атмосферных разрядов.

Электрод 2 соединяли с генератором высоковольтных импульсов напряжения положительной полярности ($\tau = 1,4$ мкс; $f = 20$ кГц; амплитуда импульсов — до 12 кВ). При подаче от источника питания 4 импульсов напряжения между электродами зажигался апокампиический разряд: яркая перемычка D между электродами — это своего рода аналог внутриоблачных разрядов, а стартующий от нее стример S (собственно апокамп) — аналог транзиентов. Благодаря емкостной развязке ($C = 10$ пФ) электрод 3 и канал D находятся под плавающим положительным потенциалом относительно земли. Авторы [12] справедливо заметили, что обычно лабораторные разряды имеют существенные отличия от разрядов, происходящих в атмосфере. Во-первых, в природе нет электродов, а есть заряженные области. Во-вторых, при моделировании разрядов низкого давления желательно иметь разряд, непосредственно не связанный с источником высокого напряжения. Используемая нами установка отвечает указанным условиям имитации атмосферных разрядов: канал D является аналогом заряженной области, а стример S непосредственно не связан с источником высокого напряжения [4].

Напротив канала D на расстоянии 3,5 см и высоте 12 см над каналом располагали фотоприемник 5 (модель H8025-222, Hamamatsu Photonics K.K.) для регистрации значений энергетической освещенности в интервале длин волн 200–360 нм. Чтобы отсечь излучение канала D, между фотоприемником и стримером S устанавливали экран 6 на расстоянии 2,8 см от центра колбы 1.

Регистрацию спектров производили, собирая излучение линзой 7 с фокусным расстоянием 30 мм, и через оптоволоконно 8 с известной спектральной зависимостью коэффициента пропускания подавали излучение на вход спектрометра 9 (HR2000+ES, Ocean Optics, Inc.) на основе многоканальной ПЗС-линейки Sony ILX511B (рабочий диапазон 200–1100 нм, спектральная полуширина аппаратной функции ~1,33 нм). Во всех опытах линзу 7 располагали на том же расстоянии, что и фотоприемник, чтобы можно было рассчитать поток излучения с учетом спектральной чувствительности фотоприемника и спектрометра.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 и 3 приведены оптические характеристики излучения апокампа. Видно, что эмиссионный спектр излучения включает в себя полосы первой отрицательной системы иона монооксида углерода $\text{CO}^+(B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+)$, частично — группу полос системы Фокса–Даффиндака–Баркера для иона диоксида углерода $\text{CO}_2^+(A^2\Pi - X^2\Pi)$, а также частично — полосу второй положительной системы азота ($C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$). Визуально свечение апокампа в углекислом газе имеет белесый оттенок и является низкоинтенсивным по сравнению с апокампом, формируемым в среде воздуха или азота. Интенсивность свечения увеличивается при снижении давления CO_2 от 120 до 3 торр, а затем падает.

Сопоставим полученные результаты с данными о транзиентах средней атмосферы Земли, их лабораторными аналогами, а также данными об атмосфере Венеры. Известно, что на Земле транзиенты

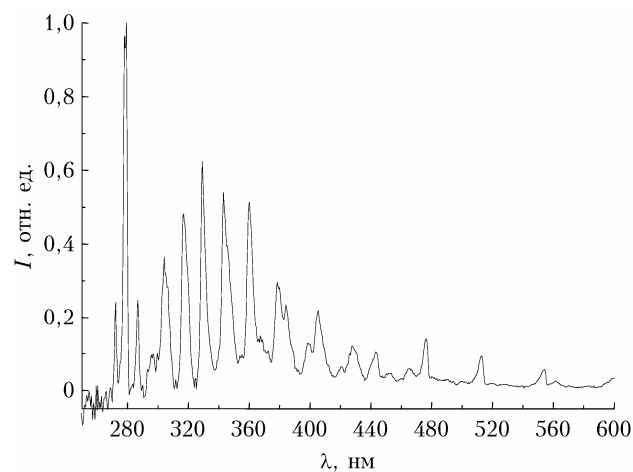


Рис. 2. Эмиссионный спектр плазмы апокампиического разряда при давлении 6 торр

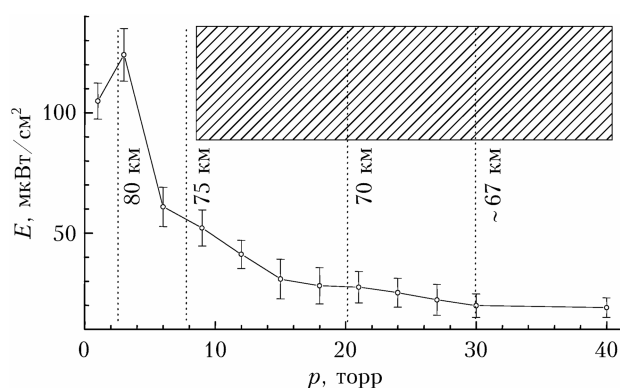


Рис. 3. Энергетическая освещенность от стримера при различных давлениях углекислого газа. Пунктирными линиями отмечены значения высот, отвечающих атмосфере Венеры; сплошная заштрихованная область соответствует зоне облачности в атмосфере Венеры

средней атмосферы формируются от верхней границы облачности, что соответствует стартовым высотам 12–18 км [4, 8]. Лабораторные исследования, проведенные с апокамписким разрядом в воздухе — модельным объектом, имитирующим транзиенты, — подтверждают следующее:

- энерговыделение внутриоблачных разрядов заметно выше, чем на более низких высотах, поэтому переизбыток энергии приводит к ее сбросу в среднюю атмосферу, что реализуется в форме транзиента [7];

- высота распространения транзиента зависит от интенсивности внутриоблачных разрядов и соотношения положительного заряда вершины купола облака и отрицательного заряда экранирующего слоя [6].

В результате формируются транзиенты мезосферы Земли, интенсивность свечения которых в видимом диапазоне спектра позволяет наблюдать за ними визуально и даже получать серии фотографий, относящихся к различным стадиям развития [13]. Надежных данных о наблюдении транзиентов в мезосфере Венеры пока нет. Впервые на возможность детектирования орбитальным спутником ультрафиолетового излучения от разрядов в атмосфере Венеры указали в работе [14]. Спутник Pioneer Venus Orbiter, выведенный на орбиту планеты в 1978 г., с периодом обращения 24 ч был оснащен спектрометром для регистрации излучения в диапазоне длин волн 150–360 нм. Однако в ходе длительного сканирования был зарегистрирован только один одиночный «всплеск» излучения, который связали с коротковолновой полосой монооксида азота NO [15].

Обратимся к рис. 3. Здесь величины давлений углекислого газа, согласно расчетам [16], привязаны к соответствующим высотам в атмосфере Венеры. Сплошная заштрихованная зона ориентировочно отвечает облачному слою нижней термосферы Венеры, которая похожа на аналогичную область Земли: здесь также накапливается облачность

и происходят внутриоблачные разряды главным образом за счет конвективного движения частиц.

О наличии таких разрядов судят, регистрируя электромагнитные волны в диапазоне частот от единиц герц до 30 кГц — так называемые свистуны (от англ. whistler), сопровождающие развитие разрядов в облаках, причем частота их появления коррелирует с формированием транзиентов (см., например, [9, 17]). «Свистуны» были неоднократно зарегистрированы и на Венере [18]. Однако в то время как на Земле большая часть конвекции происходит днем, когда Солнце сильно нагревает землю, на Венере конвекция может быть вызвана охлаждением верхней части облаков ночью [19]. С этим обычно связывают то, что пик конвективной грозовой активности на Венере обычно достигается в области сумерек и полудночи, а не в пике освещения атмосферы Солнцем, как на Земле.

Наш эксперимент наглядно показывает, что в мезосфере Венеры на границе облачности (на высотах около 70–75 км) складываются условия, подобные реализующимся в нашем опыте, в котором интенсивность свечения апокампа кратно возрастает. Аналогичная картина наблюдалась и при моделировании транзиентов в атмосфере Земли [4]. Таким образом, если исходить из единства закономерностей формирования разрядных явлений, на высотах от 70 до 80 км в мезосфере Венеры могут наблюдаться аналоги земных транзиентов, т.е. в дальнейшем необходимо целенаправленно осуществлять мониторинг именно этой области, чтобы их зафиксировать.

Тогда с точки зрения оптики можно указать на причины, по которым спутник Pioneer Venus Orbiter не выявил мезосферные транзиенты.

1. Диапазон длин волн оборудования спутника Pioneer Venus Orbiter при регистрации излучения составлял 150–360 нм. Спектр излучения апокампа (см. рис. 2) таков, что на диапазон 200–300 нм приходится примерно в шесть раз меньше энергии, чем на диапазон 300–360 нм. А если учесть, что кривые чувствительности спектрометров и фотоприемников на краях измерительных диапазонов имеют тенденцию к спаду, то восприимчивость оборудования спутника к спектральному составу излучения транзиентов мезосферы Венеры должна быть еще ниже (в 5–10 раз в зависимости от типа применяемого детектора). Поэтому в дальнейшем для более уверенной регистрации транзиентов при мониторинге мезосферы Венеры следует использовать фотоэлементы, более чувствительные к спектру, показанному на рис. 2. Вероятно, принимаемый поток излучения, если это возможно реализовать аппаратно, следует регистрировать целенаправленно с высот порядка 70–80 км.

2. В отдельном эксперименте мы заменили углекислый газ в колбе установки на воздух, чтобы сравнить энергию излучения апокампа для обеих газовых сред. Интенсивность излучения в воздухе в диапазоне длин волн 200–360 нм увеличивалась примерно в 2,8 раза. Это также свидетельствует о том,

что для наблюдения за транзидентами мезосферы Венеры требуется более чувствительная спектральная аппаратура, чем для транзистов средней атмосферы Земли.

Таким образом, проведенное лабораторное моделирование дает надежду на то, что транзисты в мезосфере Венеры со временем могут быть обнаружены, если учесть полученные рекомендации по проектированию систем детектирования таких явлений с орбитальных спутников или аэростатов.

Заключение

Область мезосферы/нижней термосферы Венеры похожа на аналогичную область в атмосфере Земли [9]. Из этой зоны на Земле стартуют голубые струи, стартеры и гигантские струи. Наши эксперименты, основанные на имитации формирования стримеров в атмосфере, проведенные в условиях, близких по газовому составу к условиям на Венере, обосновывают:

1) выбор высот, на которых следует ожидать формирование венерианских аналогов транзистов средней атмосферы Земли. Согласно экспериментам, следует ожидать формирование венерианских мезосферных транзистов вблизи границы верхней облачности в периоды смены дня на ночь, в ночное время, когда регистрируются «свистуны». Более эффективной в последующих циклах наблюдений будет комбинация электромагнитного детектора «свистунов» и оптических датчиков (на что косвенно указывал Д. Сушчинский с коллегами [20]);

2) требования к спектральной аппаратуре для их регистрации: необходимо повысить ее чувствительность в диапазоне 280–400 нм, где интенсивно излучают первая отрицательная система CO^+ , система полос Фокса–Даффиндака–Баркера иона CO_2^+ , а также молекулярные полосы CO_2 . Хотя в спектре в диапазоне 200–300 нм и наблюдаются полосы NO, их интенсивность более чем на порядок меньше (поэтому на рис. 3 этот участок спектра не приведен).

Таким образом, полученные данные имеют как практическую ценность, так и научную значимость, очерчивая границы и задавая параметры, с которыми следует строить теоретические модели, объясняющие детали осуществления транзистов мезосферы Венеры.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИСЭ СО РАН (проект № FWRM-2021-0014).

Список литературы

- Донченко В.А., Кабанов М.В., Кауль Б.В., Нагорский П.М., Самохвалов И.В. Электрооптические явления в атмосфере: учеб. пособие. Томск: Изд-во НТЛ, 2015. 316 с.
- Surkov V.V., Hayakawa M. Progress in the study of transient luminous and atmospheric events: A review // *Surv. Geophys.* 2020. V. 41. P. 1101–1142. DOI: 10.1007/s10712-020-09597-2.
- Хренов Б.А., Гарипов Г.К., Зотов М.Ю., Климов П.А., Панасюк М.И., Петров В.Л., Шаракин С.А., Широков А.В., Яшин И.В., Гребенюк В.М., Гринюк А.А., Лаврова М.В., Ткаченко А.В., Ткачев Л.Г., Ботвинко А.А., Сапрыкин О.А., Сеньковский А.Н., Пучков А.Е. Исследование вспышек излучения атмосферы в области ближнего ультрафиолета с помощью детектора ТУС на борту спутника Ломоносов // *Космические исследования* 2020. Т. 58, № 5. С. 355–368. DOI: 10.31857/S0023420620050052.
- Соснин Э.А., Бабаева Н.Ю., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Найдис Г.В., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Моделирование транзистных световых явлений средней атмосферы Земли с помощью апокампического разряда // *Успехи физ. наук*. 2021. Т. 191, № 2. С. 199–219. DOI: 10.3367/UFNr.2020.03.038735.
- Соснин Э.А., Кузнецов В.С., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Ивлев Г.А., Козлов А.В. Формирование окислов азота в лабораторном разряде, имитирующем голубые струи // *Оптика атмосфер. и океана*. 2020. Т. 33, № 12. С. 958–961. DOI: 10.15372/AOO20201209.
- Соснин Э.А., Кузнецов В.С., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Гипотеза о различных стартовых условиях для кратковременных световых явлений средней атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана*. 2021. Т. 34, № 2. С. 148–151. DOI: 10.15372/AOO20210210.
- Соснин Э.А., Кузнецов В.С., Панарин В.А. Энерговыделение в грозном облаке, необходимое для образования транзистных световых явлений средней атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана*. 2021. Т. 34, № 8. С. 1–4. DOI: 10.15372/AOO202108; Sosnin E.A., Kuznetsov V.S., Panarin V.A. Energy release in a thundercloud necessary for the formation of middle atmosphere transient light phenomena // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 6. P. 722–725.
- Siingh D., Singh R.P., Kumar S., Dharmaraj T., Singh A.K., Patil M.N., Singh Sh. Lightning and middle atmospheric discharges in the atmosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015. V. 134. P. 78–101. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.10.001.
- Lorenz R.D. Lightning detection on Venus: A critical review // *Prog. Earth Planet. Sci.* 2018. V. 5. 34 p. DOI: 10.1186/s40645-018-0181-x.
- Мороз В.И. Атмосфера Венеры // *Успехи физ. наук*. 1971. Т. 104, № 2. С. 255–296. DOI: 10.3367/UFNr.0104.197106c.0255.
- Johnson N.M., de Oliveira M.R.R. Venus atmospheric composition in situ data: A compilation // *Earth Space Sci.* 2019. V. 6, N 7. P. 1299–1318. DOI: 10.1029/2018EA000536.
- Robledo-Martinez A., Garcia-Villarreal A., Sobral H. Comparison between low-pressure laboratory discharges and atmospheric sprites // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122, N 1. P. 948–962. DOI: 10.1002/2016JA023519.
- Chanrion O., Neubert T., Mogenssen A., Yair Y., Stendel M., Singh R., Siingh D. Profuse activity of blue electrical discharges at the tops of thunderstorms // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44. P. 496–503. DOI: 10.1002/2016GL071311.
- Borucki W.J., McKay C.P., Jebens D., Lakkaraju H.S., Vanajakshi C.T. Spectral irradiance measurements of simulated lightning in planetary atmospheres // *Icarus*. 1996. V. 123. P. 336–344. DOI: 10.1006/icar.1996.0162.
- Huestis D.L., Slanger T.G. New perspectives on the Venus nightglow // *J. Geophys. Res.: Planets*. 1993.

- V. 98, N E6. P. 10839–10847. DOI: 10.1029/93JE00997.
16. *Petropoulos B.* Physical parameters of the atmosphere of Venus // *Earth Moon Planet.* 1988. V. 42. P. 29–40. DOI: 10.1007/BF00118037.
 17. *Малкин Е.И., Казаков Е.А., Санников Д.В., Чернева Н.В., Марченко Л.С., Дружин Г.И.* Статистическая связь между вистлерами и спрайтами по данным AWDANET и WWLLN // *Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2022. Т. 41, № 4. С. 178–190. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-178-190.
 18. *Russell C.T., Zhang T.L., Wei H.Y.* Whistler mode waves from lightning on Venus: Magnetic control of ionospheric access // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 113. E00B05. DOI: 10.1029/2012GL054308.
 19. *Imamura T., Higuchi T., Maejima Y., Takagi M., Sugimoto N., Ikeda K., Ando H.* Inverse insolation dependence of Venus' cloud-level convection // *Icarus.* 2014. V. 228. P. 181–188. DOI: 10.1016/j.icarus.2013.10.012.
 20. *Suszcynsky D.M., Kirkland M.W., Jacobson A.R., Fanz R.C., Knox S.O., Guillen J.L.L., Green J.L.* FORTE observations of simultaneous VHF and optical emissions from lightning: Basic phenomenology // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2000. V. 105(D2). P. 2191–2201. DOI: 10.1029/1999jd900993.

E.A. Sosnin, V.A. Panarin, V.S. Skakun, D.A. Sorokin. The hypothesis of transient light events in the mesosphere of Venus.

Observations of the state of the mesosphere of Venus from spacecraft have not yet revealed transient luminous events similar to those observed in the Earth's atmosphere. In this work, a possibility of such phenomena is proved in laboratory conditions. For this purpose, an experiment was conducted on the formation of apokamps in carbon dioxide at various pressure values. The results confirm the hypothesis that conditions at altitudes corresponding to the upper edge of clouds in the atmosphere of Venus are favorable for the generation of analogues of transients of the Earth's mesosphere. Based on this, recommendations have been developed for the design of detection systems for such phenomena from orbiting satellites or balloons.