

УДК 523.42.

ВСПЫШКИ МОЛНИЙ В ОБЛАЧНОМ СЛОЕ ВЕНЕРЫ ОБНАРУЖЕНЫ В БЛИЖНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

©2024 г. Л.В. Ксанфомалити¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 01.09.2019 г.¹

После доработки 15.08.2023 г.

Принята к публикации 25.08.2023 г

Венера была первой среди планет Солнечной системы, в атмосфере которой были обнаружены электрические явления, подобные молниям в атмосфере Земли. Электрические разряды (молнии в атмосфере Венеры) были открыты в 1978 г. в миссиях «Венера-12, -11» и *Pioneer Venus* по их электромагнитному излучению. Парадокс, однако, заключался в том, что поиски оптических вспышек оставались безуспешными в течение сорока последующих лет. В 2015 г. на орбиту спутника Венеры был выведен аппарат *AKATSUKI* японского космического агентства JAXA. Он был предназначен для поиска молний и других исследований метеорологии Венеры путем регистрации излучения в выбранных спектральных диапазонах. В 2016 г. орбитальный аппарат *AKATSUKI* успешно выполнил подробные наблюдения Венеры в ближнем ИК-диапазоне в «окнах прозрачности» атмосферы планеты, а также в ультрафиолетовом и других диапазонах. В статье приводятся результаты альтернативного поиска и успешного обнаружения вспышек молний по данным проекта *AKATSUKI*, но не в ультрафиолетовом и не в видимом, а в ближнем ИК-диапазоне. Сопоставление результатов расчета, основанного на моделях земных молний, с результатами измерений, выполненных камерой IR2 миссии *AKATSUKI* на Венере на волне 2.26 мкм, показывает близкое совпадение экспериментальных и расчетных данных.

DOI: 10.31857/S0023420624010052

ВВЕДЕНИЕ

Электрические явления в атмосфере Венеры были открыты в 1978 г. [1, 2] – 21 и 25 декабря приборы «Гроза» на спускаемых аппаратах «Венера-12, -11» зарегистрировали многочисленные электромагнитные импульсы типа земных атмосфериков в диапазоне 10–80 кГц. Через три дня такой же результат, но в моде вистлера, был получен с помощью прибора OEFD на орбитальном аппарате *Pioneer Venus* [3–5]. В 1982 г. эксперимент «Гроза» был успешно повторен на спускаемых аппаратах «Венера-13, -14».

Признаком электрических разрядов было их импульсное электромагнитное излучение в диапазоне 10–80 кГц. Яркие вспышки молний относятся к основным свойствам земных гроз. Но на Венере сопутствующие оптические вспышки не наблюдались, хотя их поиск был организован сначала на орбитальных модулях тех же аппаратов «Венера-12, -11» и *Pioneer Venus* [6, 7], а в дальнейшем на пролетных аппаратах *Galileo*,

Cassini и орбитальных аппаратах «Венера-15, -16» и *Venus Express*. Поиск вспышек велся на ночной стороне планеты. Во всех случаях уверенно регистрировались частые электромагнитные разряды (скорость счета до 30 с⁻¹), но при отсутствии оптических вспышек.

Интерес к электрическим атмосферным разрядам на Венере связан, в частности, с вопросом о происхождении малых составляющих в ее атмосфере. Молнии, с одной стороны, разрушают молекулярные связи среды в канале разряда, с другой – вызывают быстротекающие химические реакции с появлением новых неравновесных химических соединений, которые в том числе могут быть связаны с последующими биохимическими процессами. Общеизвестно образование в грозах озона.

Схема экспериментов по регистрации электромагнитного излучения и поиску вспышек представлена на рис. 1. Орбитальный аппарат *Pioneer Venus* находился на орбите с очень низким перицентром, около 150 км. Спускаемые аппараты «Венера» парашютировали в плотной атмосфере, опускаясь со скоростью 600 м/с.

¹ Рукопись статьи найдена И.В. Шульгиной и С.Г. Коростелевым в архиве Л.В. Ксанфомалити в январе 2023 г.

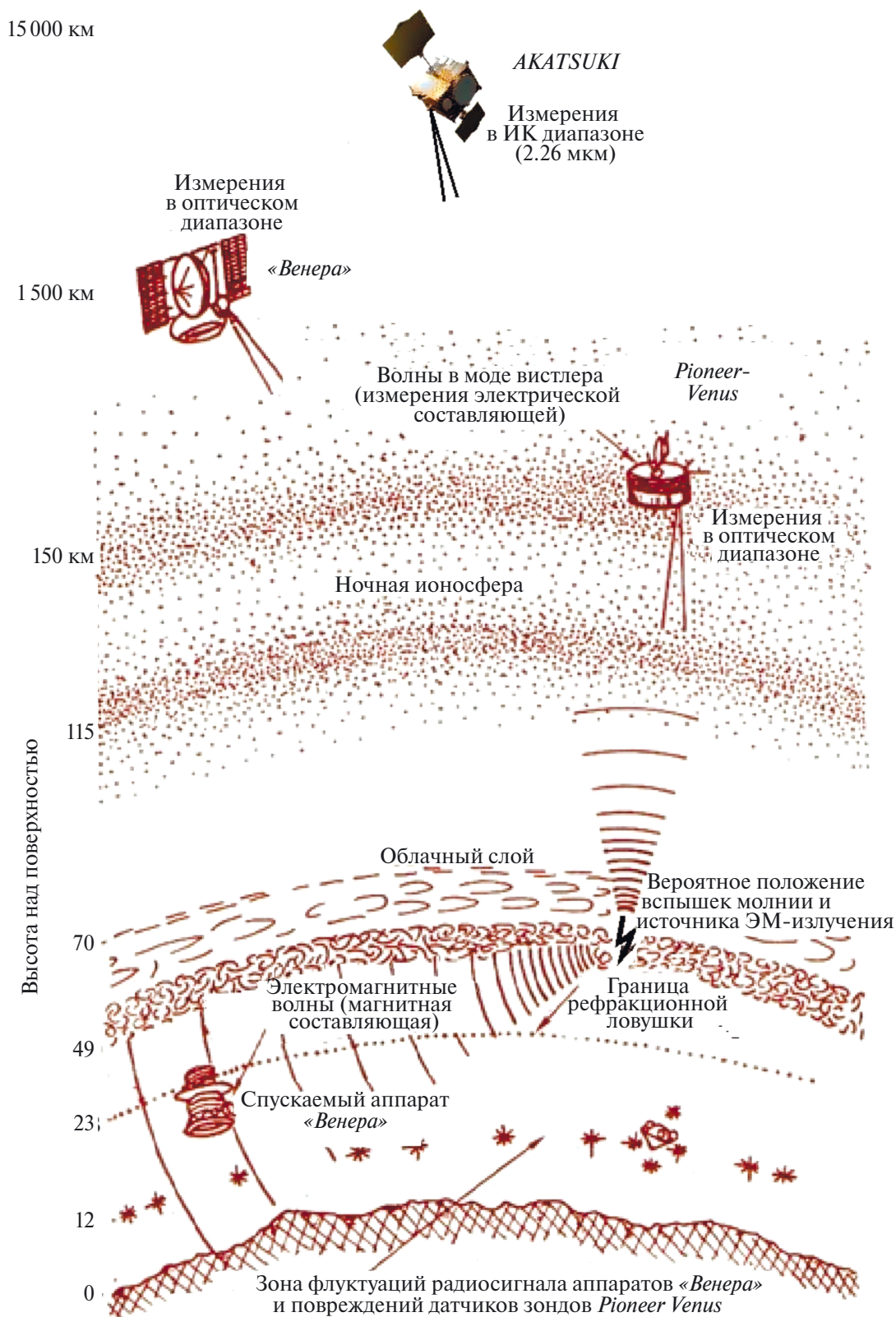


Рис. 1. Сравнительная схема работы аппаратов «Венера», *Pioneer Venus* и *AKATSUKI* при регистрации электромагнитного излучения молний и поиске их оптических вспышек.

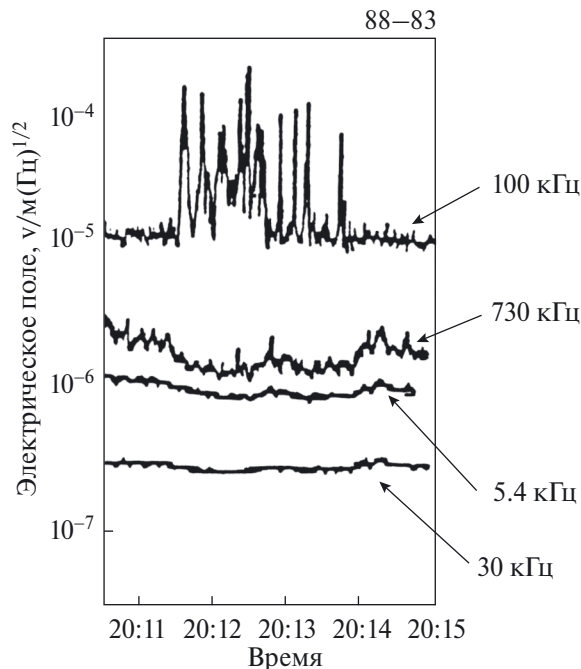


Рис. 2. Импульсы электромагнитного излучения, зарегистрированные 08.11.1979 г. прибором OEFD на борту орбитального модуля *Pioneer Venus*, Орбита 66. Импульсы наблюдались в низком перицентре орбиты аппарата.

Перицентр аппарата *AKATSUKI* изменялся от 1000 до 10 000 км над поверхностью.

Орбитальный модуль *Pioneer Venus* с прибором OEFD находился выше ионосферы планеты. Приемник OEFD имел поддиапазоны в области низких и очень низких частот: 30 кГц, 5.4 кГц, 730 Гц и 100 Гц. Излучение (в режиме вистлера, т.е. волны, распространяющейся вдоль магнитной силовой линии) регистрировалось вблизи перицентра орбиты. Напомним, что у Венеры нет собственного дипольного магнитного поля, а поле, наведенное во взаимодействии с «солнечным ветром», вообще говоря, может иметь случайное направление.

На рис. 2 приведен пример регистрации ЭМ-излучения приемником OEFD в начальной серии наблюдений [4, 3]. Авторы указывали на три свойства зарегистрированных импульсов, присущих волне в режиме вистлера: сигнал наблюдается только в диапазоне 100 Гц, напряженность магнитного поля более 10 нТ, поле направлено к поверхности и пересекает ее. Несмотря на указанные ограничения, в эксперименте OEFD подобные результаты были получены в многочисленных проходах перицентра орбиты.

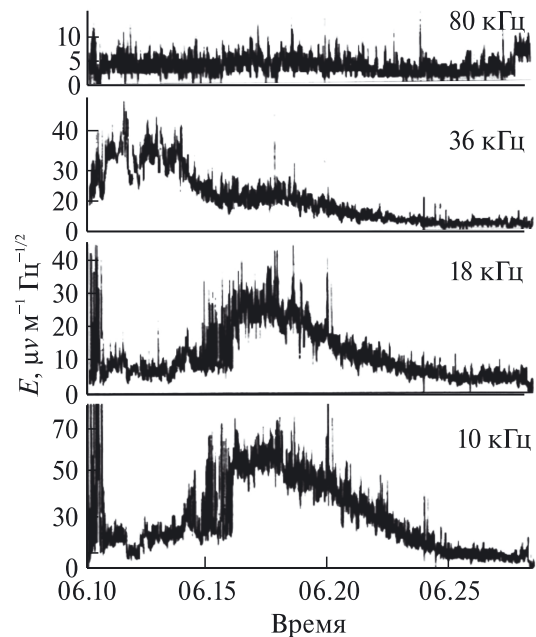


Рис. 3. Напряженность поля многочисленных электромагнитных импульсов, зарегистрированных 25.11.1978 г. прибором «Гроза» на спускаемом аппарате «Венера-11», отнесенных к молниям. Фрагмент записи от высоты 10 км до поверхности. Причина различий напряженности на частотах 18 и 36 кГц осталась неизвестной.

Приемник «Гроза» на аппаратах «Венера-11» — «Венера-14» был в преимущественном положении по сравнению с OEFD и регистрировал длинноволновое излучение источников, вероятно удаленных на тысячи километров (рис. 3). Благодаря высокой плотности атмосферы, длинноволновое излучение испытывает сильную рефракцию, образуя своеобразную ловушку, отклоняющую

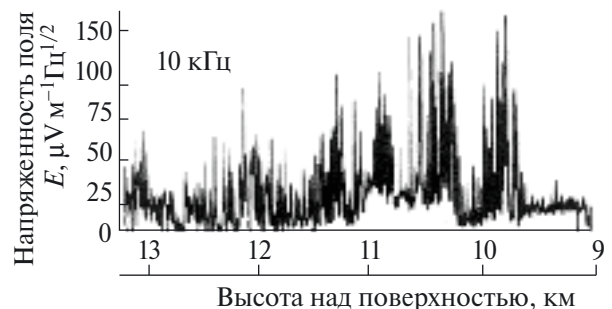


Рис. 4. Периодические изменения напряженности поля от удаленного источника, зарегистрированные прибором «Гроза» на аппарате «Венера-11», вращающемся при спуске в атмосфере планеты. Периодичность возникала благодаря эффекту направленности рамочной антенны прибора.

волну к поверхности [8]. Образуется необычный рефракционный «волновод». Наряду с монотонным характером изменения напряженности поля (до $80 \text{ мкВ м}^{-1} \text{ Гц}^{1/2}$) наблюдались его периодические изменения (рис. 4).

Периодичность возникала благодаря ограниченному угловым размерам удаленного источника и вращению аппарата. Приемник «Гроза» имел петлевую (рамочную) антенну, диаграмма направленности которой имела форму «восьмерки». Как было показано в работе [4], источник был локальным и находился на расстоянии менее тысячи километров. Его импульсы имели более высокую амплитуду по сравнению с фоном, напряженность поля на частоте 10 кГц достигала $100 \text{ мкВ м}^{-1} \text{ Гц}^{1/2}$ (рис. 4). Можно было сделать вывод, что удаленным источником может быть локальная гроза. Рассматривалось и предположение о другой природе источника импульсов, возможно, привязанного к какому-то объекту на поверхности планеты.

Как уже отмечалось, результаты, подобные показанным на рис. 2–4, были получены и на других аппаратах, работавших у Венеры. Но, начиная с момента открытия, многолетние поиски вспышек молний, которые должны были бы сопровождать электромагнитные импульсы, оставались безрезультатными.

Опубликовано много работ, в которых авторы предлагают то или иное объяснение этому парадоксу. Подробные сведения о проведенных поисках вспышек можно найти в обзоре *Lightning detection on Venus: a critical review* [9]. Автор указывает, что на 2018 г. по теме было опубликовано 180 работ. Отметим, что задача поиска молний относилась также к главным исследованиям орбитальной миссии *AKATSUKI* Японского космического агентства JAXA. Поиск велся в УФ-диапазоне (365 нм) на ночной стороне планеты специально сконструированным инструментом LAC с высокой частотой опроса [10]. О результатах поиска не сообщается.

ВЫБОР СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ПОИСКА ВСПЫШЕК

Возможная причина отсутствия наблюдений вспышек при электрических явлениях в атмосфере Венеры рассматривалась автором в ряде опубликованных статей. Если разряды происходят в нижних слоях облаков, значительная экстинкция в оптическом диапазоне настолько ослабляет вспышки, что их регистрация со спутников Венеры становится невозможной [1, 11].

Автору однажды довелось наблюдать сильную земную грозу с самолета, летевшего ночью высоко над грозовыми облаками. В местах вспышек вместо молний на облаках возникали светящиеся многокилометровые круги правильной формы с убывающей к краям яркостью. Сами молнии видны не были. Так проявляется рассеяние света вспышки в сильно рассеивающей среде. Но в обнаружении вспышек молний на Венере ситуация была другой.

В случае Венеры оптическая толща облаков т очень значительна. Она аккуратно измерялась на спускаемых аппаратах, от «Венеры-9» до «Венеры-14», и на зондах миссии *Pioneer Venus*, причем разброс значений очень велик, от 20 до 38 и даже до 50 («Венера-13») в диапазоне $400\text{--}1150 \text{ нм}$ [12]. Сильно ослабленное излучение (до величины $e^{-\tau \sec z}$, где z — зенитный угол для излучения, покидающего атмосферу, τ — оптическая толщина от источника света (молнии) до верхней границы атмосферы (по вертикали)) в оптическом диапазоне практически не достигает детекторов. Почему столь очевидная причина в обзоре [9] не приводится — остается непонятным. В рассматриваемых ниже случаях вспышки наблюдались в разрывах облаков, в инфракрасном диапазоне.

Величина экстинкции значительно ниже в ближнем ИК-диапазоне (2 мкм), но необходимых данных в исследованиях Венеры долго не удавалось найти. В составе миссии *Venus Express* выполнялся подобный эксперимент *Virtis* (см., например, [13]), но объем полученных данных был ограничен. Поэтому, когда в 2016 г. в ИК-экспериментах с камерой IR2 миссии *AKATSUKI* был получен богатый наблюдательный материал (<http://www.darts.isas.jaxa.jp/planet/project/akatsuki/ir2.html.en>, сайт JAXA DARTS), именно результаты этих наблюдений и материалы опубликованных статей [14] были положены в основу поиска вспышек молний в настоящей работе.

Для изучения структуры ночных облаков в камере IR2 предназначались узкие полосы у 1.775 и 2.26 мкм . Экстинкция минимальна на волне 2.26 мкм , поэтому именно снимки « 2.26 мкм » камеры IR2 использованы в настоящей работе. Фактически центр полосы находится у 2.27 мкм , а ее ширина около 0.052 мкм . Рассеяние определяется радиусом частиц r как $2\pi r/\lambda$, поэтому рассеяние на волне 2.26 мкм в четыре раза ниже, чем на волне 0.55 мкм и в шесть раз ниже, чем в полосе поиска молний в эксперименте LAC. Действительные значения экстинкции удаётся получить путем расчетов, основанных непосредственно на калибровочных данных камеры

IR2 миссии *AKATSUKI*. В рассматриваемых ниже разрывах облаков экстинкция составила $0.20\text{--}0.27\text{ км}^{-1}$. Для поиска молний ИК-изображения обладают важными преимуществами перед изображениями в оптическом диапазоне. Большинство ИК-снимков было получено с 7-секундной экспозицией. Помимо того что рассеяние меньше в шесть раз за счет отношения $2\pi r/\lambda$, есть и другое преимущество. Благодаря высокой яркости вспышек их изображения постепенно накапливаются на матрице детектора, фактически записываются в течение 7-секундной экспозиции, независимо от кратковременности самой вспышки. Искомые вспышки удалось найти, причем яркость в них доходит до насыщения детектора, хотя предварительный расчет давал не слишком оптимистический прогноз обнаружения. Типичная вспышка земной молнии имеет длительность от 0.2 до 1 с и включает многократные последовательные разряды длительностью около 50 мкс [15–18]. Поэтому, чтобы изображение вспышки длительностью 0.3 с было зафиксировано на матрице детектора, яркость вспышки должна быть не менее чем в 23 раза ($7/0.3$) интенсивнее средних по яркости деталей изображения. Разумеется, важную роль играют линейность и порог насыщения детектора. Успеху поиска сопутствовала важная особенность наблюдений в длине волны 2.26 мкм,

рассматриваемая ниже, — вспышки наблюдались в протяженных узких разрывах слоя облаков.

ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ С КАМЕРОЙ IR2, И ИХ ОБРАБОТКА

В удачные дни с камерой IR2 в фильтре 2.26 мкм удавалось получить до 60 снимков. Подавляющее их большинство имеет невысокое разрешение, всего несколько сотен линий на изображение. Исходя из предварительно сделанных расчетов необходимого разрешения, для поиска молний они интереса не представляют. Но есть небольшое число снимков с высоким разрешением, причем в нескольких случаях они составляют последовательность из 2–3 изображений, что позволяет проследить развитие событий. Качество снимков очень неоднородно, что еще больше ограничивает возможности исследований. Некоторые изображения безупречны, но не все снимки одинаково сфокусированы. Практически лишь около десяти снимков удалось использовать в настоящей работе.

Снимки брались с сайта открытого доступа архива DARTS Японского космического агентства JAXA (<https://www.darts.isas.jaxa.jp/planet/project/akatsuki/ir2.html.en>) и были подвергнуты следующей обработке.

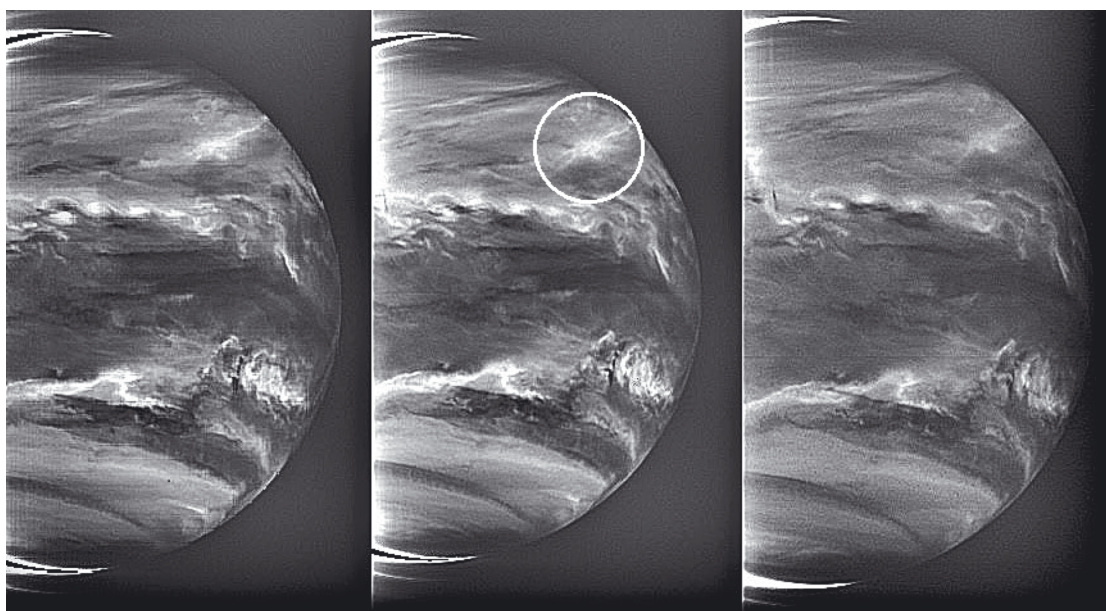


Рис. 5. Ночные снимки в длине волны 2.26 мкм, полученные 13.VIII.2016 г. с интервалами по 2 ч (00:33:33, 02:33:33 и 04:33:33 UTC). Звездообразный *L*-объект с лучами (в кружке) на широте примерно 36° N наиболее четко представлен на среднем снимке (02:33:33). Его размеры около 600 км, лучи уходят на 1000 км.

1. Выбиралась ночная часть конкретного изображения в формате fit, и из архива извлекались его паспортные данные (приводимые в файлах с расширением <.lbl>), например снимок 20.X.2016, ir2_20161020_094833_226_l2b_v10.lbl.

2. На калиброванных изображениях выделялись реперные участки, шкала яркости которых была известна, для сохранения примерной шкалы яркости при дальнейшей обработке.

3. Резкость изображения повышалась с помощью стандартных операций повышения четкости, например программ, использованных для повышения резкости изображений Меркурия [19]. Удобные операции повышения резкости содержатся в известной программе Photoshop. В обработке использовалась вкладка с операцией Unsharpmask умеренной глубины и с последующей операцией Smartsharpen.

4. Уровни «черного» и «белого» можно было аккуратно изменять с помощью программы АИМАР, разработанной В.О. Кахиани [20]. (Таковыми же возможностями обладают многие популярные программы.) Выбирались уровни «черного», позволяющие обнаружить детали с аномальной яркостью.

Следует отметить, что изображения, полученные с камерой IR2, находятся на пределе возможностей современной измерительной техники. Температура детектора поддерживалась на криогенном уровне 45–69 К. Как обработка, так и последующий анализ изображений требуют от исследователя определенной деликатности. Только аккуратно обработанные изображения с тщательно выбранными характеристиками обработки были пригодны к анализу.

Здесь следует подчеркнуть важную особенность снимков камеры IR2. Рис. 5 и последующие снимки нельзя воспринимать как обычный вид сцены, освещенной извне. Скорее его можно представить себе как почти ровный светлый фон излучения средних слоев атмосферы, на который, как диапозитивом, наложено поглощение и рассеяние в слое облаков, расположенных выше, в интервале 49–57 км. Поглощающая облачная среда, согласно [14], состоит в основном из «моды 3» — микрокапель серной кислоты со средними размерами около 3.7 мкм. Таким образом, сравнительно ровный фон излучения горячей атмосферы виден на просвет, сквозь неоднородный слой поглощающих облаков. Фоновое излучение в полосе 2.26 мкм создается в основном горячей атмосферой ниже уровня высот 41 км (температуры 412 К и более). Светлые

области соответствуют низкому, темные — высокому поглощению фонового излучения. Наиболее яркие детали шкалы яркости исходных изображений соответствуют примерно уровню $150 \text{ мВт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, самые темные — уровню примерно $20 \text{ мВт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$.

Название приводимых снимков расшифровывается как номер витка орбиты аппарата AKATSUKI, дата и время начала экспозиции.

Количество успешных наблюдений достигло своего максимума в августе — сентябре 2016 г. Наблюдения прекратились в декабре 2016 г., но причиной была не камера IR2, а проблема с электроникой контроллера изображения. Последнее лучшее изображение было получено в октябре 2016 г.

АНАЛИЗ ГРУППОВЫХ ВСПЫШЕК

Главные результаты работы, приводимые далее, относятся к ночным группам вспышек. Их долго не удавалось найти. Но дальнейший анализ изображений, полученных камерой IR2 в полосе 2.26 мкм, позволил обнаружить снимки с несомненными частыми вспышками молний, по характеристикам предположительно близким к земным нормальным молниям.

Три снимка от 13.VIII.2016. Как отмечалось выше, подавляющее большинство снимков камеры IR2 на длине волны 2.26 мкм имеют низкое разрешение. Снимков с высоким разрешением немного. Три ночных снимка безукоризненного качества, с высоким разрешением, r0023 (номер орбиты), 20160813 (дата в формате ГГГГММДД), 003333, 023333 и 043333 (время UTC в формате ЧЧММСС), были получены с интервалами 2 ч. Они приведены на рис. 5. Планетоцентрическая высота аппарата составляла 151.4 тыс. км. Координаты подспутниковой точки на среднем снимке $3.45^\circ \text{ N}/46.7^\circ \text{ E}$ (различия координат точки на снимках невелики). Контрастная система светлых и темных полос напоминает пояса и зоны Юпитера, но сходство, конечно, только внешнее. Наиболее четкий рисунок — средний, 023333. Светлая полоса, которая проходит примерно вдоль северной широты 20° , распадается на периодические волнообразные сгущения, разделенные интервалами по 9° . Выше на снимках, на широте около 36° и в 30° к востоку от центра среднего снимка (центр 3.45° N и 46.7° E) находится интересное метеорологическое образование (в белом кружке), назовем его *L*-объектом. Это яркая кольцевая структура диаметром около 600 км с исходящими радиально направленными лучами, отходящими

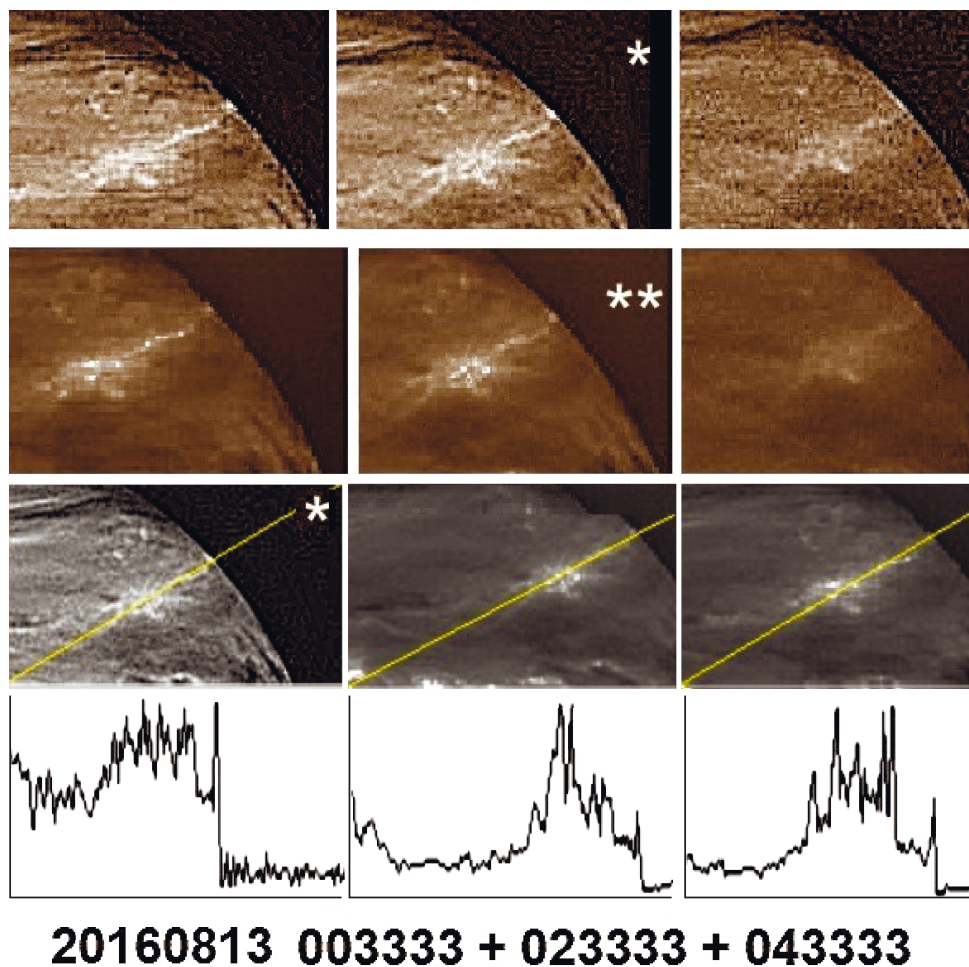


Рис. 6. Верхний ряд — *L*-объект на трех последовательных снимках, второй ряд — те же снимки со смещенным вверх уровнем черного, ряды 3 и 4 — распределение яркости вдоль линий сечения изображений второго ряда.

на расстояние до 1000 км. В центре структуры видна яркая деталь.

Ее координаты, если их относить к поверхности, примерно 36° N и 86° E (западная часть *Asteria Regio*). По виду *L*-объект с его радиальной периферией напоминает ночные снимки наиболее крупных земных городов. Автору неизвестно, к какому типу объектов земной метеорологии следовало бы отнести *L*-объект, во всяком случае, на циклоны он не похож, а для следов метеоритного удара он слишком велик. Некоторые предположения приводятся ниже.

Верхний ряд на рис. 6 повторяет вид *L*-объекта. В тех случаях, когда разрядность исходного снимка допускает, можно выделить какой-то интервал яркостей изображения, чтобы подчеркнуть малозаметные детали. Для этого можно применить смещение уровня черного или гамма-коррекцию. Гамма-коррекция является

операцией нелинейной, поэтому смещение уровня черного предпочтительнее. Операция напоминает наблюдение яркого объекта сквозь затемненный фильтр. Данные по калибровке исходных снимков взяты из работы [14]. Если порог воспроизводимых яркостей («уровень черного») поднять до $130\text{--}150 \text{ мВт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, *L*-объект превращается в группы многочисленных ярких точек размерами от одного до четырех пикселей (второй ряд на рис. 6), расположенных по-разному на трех последовательных снимках. Один пиксел в центре рис. 5 соответствует 29 км.

Кроме положения уровня черного, критическим условием выделения ярких точек является четкость изображения. Последний снимок (043333) был недостаточно сфокусирован при съемке, и исправить этот дефект не удалось. Поэтому здесь яркие точки размыты и видны плохо. Звездочками помечен средний, наиболее

удачный снимок (023333). В третьем и четвертом рядах рис. 6 показаны сечения, проходящие через L -объект. Как можно видеть, во всех случаях яркие точки соответствуют уровню насыщения элемента матрицы, накоплены за короткий интервал в течение 7-секундной экспозиции и принадлежат источникам радиации, примерно в четыре раза превышающим самые яркие протяженные участки изображений. Трудно найти и объяснить другое их происхождение, кроме вспышек молний. Причем на снимках виден не рассеянный облаками свет грозы, а сами вспышки, на что указывают регистрация событий единичными пикселями и их насыщение. Соответствует ли ядро L -объекта рисунка полному разрыву облаков или только их значительному утоньшению, судить трудно. В любом случае оптическая толща среды над ним невелика.

О природе L -объекта можно строить разные предположения. Обращают на себя внимание его огромные масштабы, а его упорядоченная структура не повторяется ни на одном из других

снимков и скорее должна быть связана с локальными особенностями конвекции. Например, в работах [21] и [22] приводились вероятные свидетельства происходящих на Венере грандиозных вулканических извержений. Конвекция над ними могла бы быть возможным объяснением.

Снимок, сделанный 20.X.2016. Не менее интересным оказался одиночный снимок r0030 20161020 094833, сделанный 20.X.2016 г. с расстояния 202 тыс. км от верхней границы облаков (рис. 7). Яркая полоса в экваториальном поясе (слева на рис. 7а) оказалась неоднородной.

Порог воспроизводимых яркостей на рис. 7б, в центре, был установлен на уровне около $140 \text{ мВт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. При повышении уровня «черного» светлая полоса распадается на отдельные яркие пиксели (в насыщении), одиночные или объединенные по два или четыре. Протяженность активной области 1300, ширина от 100 до 340 км.

Все, даже наиболее светлые остальные детали снимка оказались ниже этого уровня

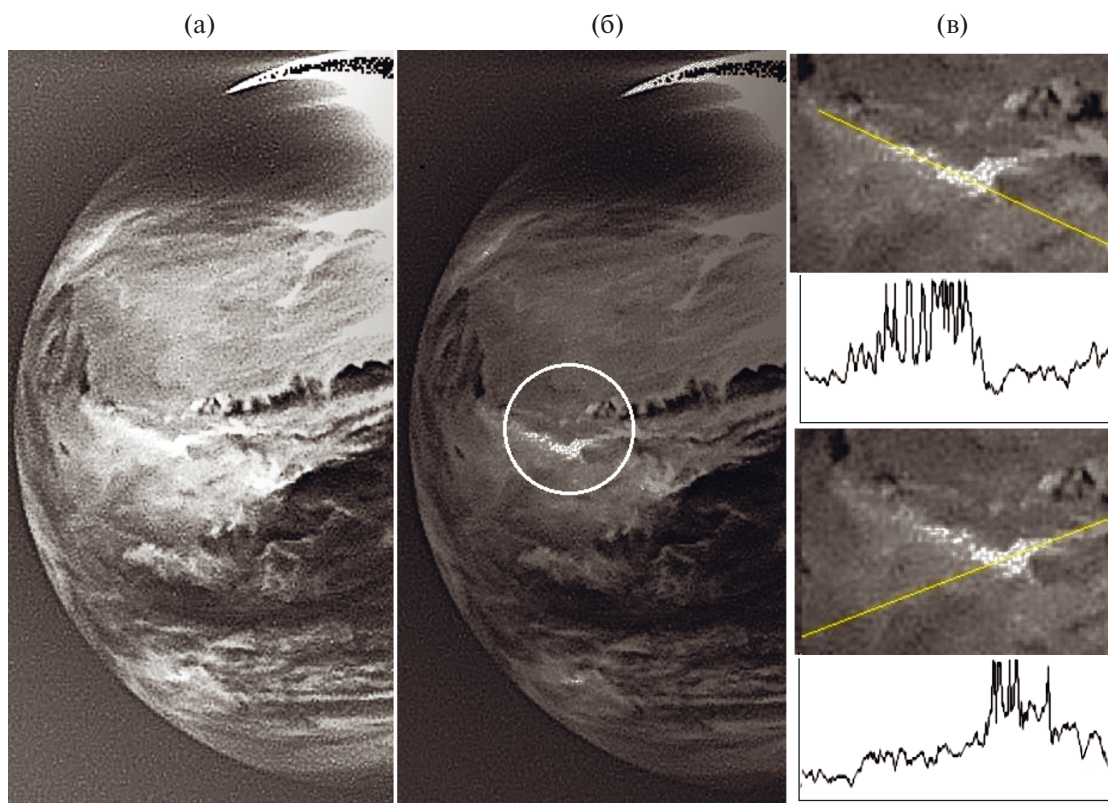


Рис. 7. На рисунке а — исходный снимок, сделанный 20.X.2016 г. в 09:48:33 UTC, с яркой полосой в экваториальной области. Координаты подспутниковой точки 8.26° S , 182° E . На рисунке б — тот же снимок с порогом воспроизводимых яркостей $> 140 \text{ мВт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. На рисунке в — распределение яркости вдоль линий сечения. Все яркие точки соответствуют уровню насыщения элементов детектора.

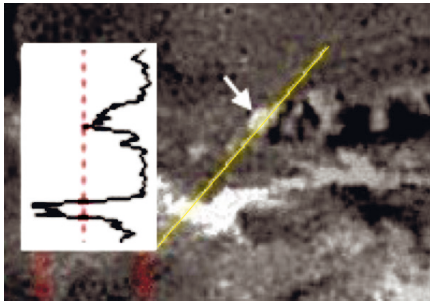


Рис. 8. Фрагмент изображения рис. 7в, показывающий небольшое пятно, где около 10 вспышек были зарегистрированы сквозь облачную среду с оптической толщиной около 0.7.

($140 \text{ мВт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$), и только широкая полоса выделяется многочисленными яркими точками. Следует отметить, что разрешение на снимке r003020161020094833 уступает рис. 5 на 33%, а размер одного пиксела соответствует 39 км на облачном слое. По-видимому, полоса оказалась разрывом облаков над уровнем гроз, обнажающим многочисленные вспышки молний, соответствующие на рисунке деталям размером 1–4 пиксела. Ни одна из других деталей изображения подобной структуры не обнаруживает. Ближе к лимбу, в верхней и нижней частях рисунка видны небольшие группы из нескольких ярких пикселей.

Что касается ослабленного облаками излучения вспышек, их можно обнаружить лишь там, где оптическая толщина среды невелика. Так, в 600 км к северу от центра скопления вспышек, на рис. 7в можно видеть небольшое пятно, показанное стрелкой на рис. 8. Пятно включает около 10 вспышек, зарегистрированных за 7 с. Здесь небольшая часть грозового района накрыта облачной средой. Если считать, что отношение высот пиков на диаграмме рис. 5 близко к 2 (т.е. $e^{-\tau_{\text{sec}} z} = 0.5$), то оптическая толщина τ среды над грозой невелика, около 0.7. Возвращаясь к упоминавшейся выше особенности земной грозы, где извне молнии наблюдались как размытые яркие пятна, можно видеть, что размытие вспышек на рис. 5–7 незначительно. Кроме разрыва надоблачной среды над вспышками, само рассеяние в 2.26 мкм более низкое, а высоты, где происходят разряды, можно указать только приблизительно (около 49 км).

К особенностям явления следует отнести ясную видимость вспышек в разрывах на рис. 7, отличающую их от упоминавшегося в начале статьи сильного рассеяния света вспышек средой над земными молниями. Это обстоятельство также позволяет исключить их связь со странной зоной на высоте 12–13 км, обсуждавшуюся в разделе «Молнии» книги Л.В. Ксанфомалити [12]. Зона была обнаружена по повторяющемуся

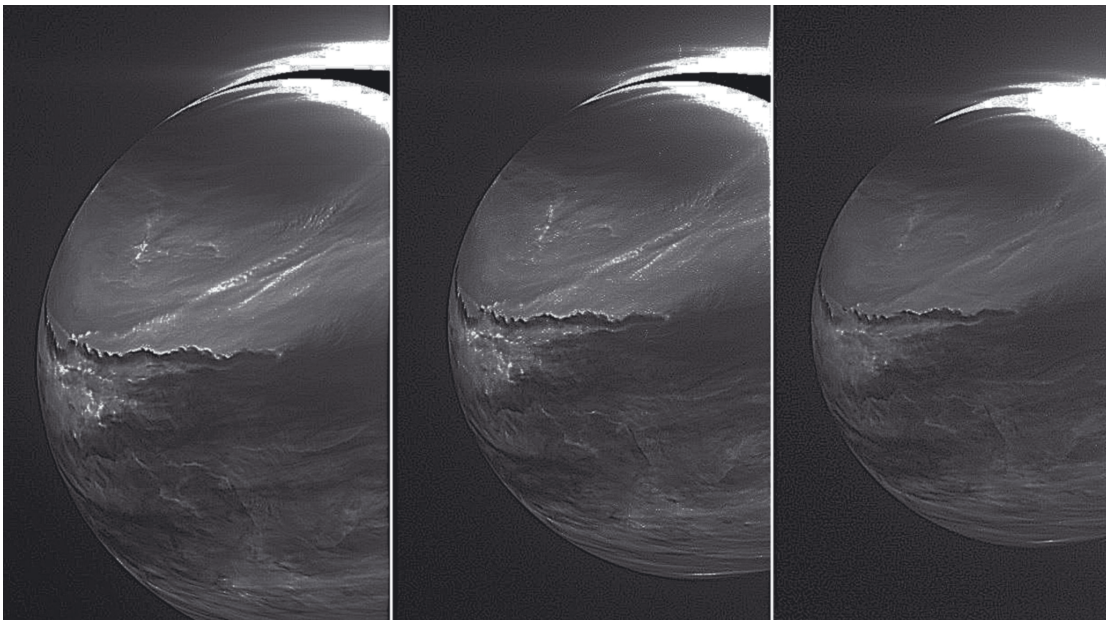


Рис. 9. Точечные следы предполагаемых вспышек молний в северном полушарии вдоль линий частичного или полного разрыва облаков. Снимки сделаны 19.X.2016 г. с интервалом 2 ч (слева направо в 14:33:32, 16:33:33 и 18:33:33 UTC) при планетоцентрической высоте аппарата 123 278 км. Порог воспроизводимых яркостей был установлен на уровне около $140 \text{ мВт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$.

аномальному фазовому сдвигу радиосигналов аппаратов «Венера» и повреждению внешних датчиков зондов *Pioneer Venus*.

Три снимка ночного западного полушария, полученные 19.X.2016. Интересны группы ярких точек глобальной протяженности, образующих полосы на рис. 9, где показаны три снимка для орбиты r0030, 20161019 143332, 163333 и 183333 (слева направо), за 19.X.2016. Снимки обладают высоким разрешением (один пиксел в центре рис. 9 соответствует квадрату 19×19 км на облачной поверхности), но сфокусированность изображения на последнем снимке (183333) хуже других. Как и на рис. 5–7, порог воспроизводимых яркостей был установлен на уровне около $140 \text{ мВт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, что позволило выделить две наклонные полосы протяженностью примерно 4–6 тыс. км, отличающиеся многочисленными яркими точками, состоящими из 1–4 пикселов. Несмотря на сходство последовательных изображений, видно, что положение точек вдоль полос, их группы и распределение максимумов за 2 ч заметно сместились.

По аналогии с рис. 7 можно предположить, что яркие точки вспышек представляют собой зарегистрированные за 7 с молнии в полосах разрывов или в местах значительной разреженности облачного покрова. Западнее на рис. 7, примерно на той же широте, что и полосы, на первом снимке видна линейно расположенная группа ярких точек. На втором снимке они образуют сектор круга, который замечен также на третьем снимке. На других изображениях подобные глобальные структуры не обнаружены, возможна ли их связь и положение с периодичностью динамических процессов в атмосфере, остается неизвестным.

СВОЙСТВА МОЛНИЙ НА ВЕНЕРЕ

Приведенные выше результаты позволяют рассчитать, какими физическими свойствами должны обладать атмосферные разряды на Венере. Предполагая, что они подобны молниям в атмосфере Земли, напомним основные характеристики последних (табл. 1) согласно работам [15–18]. По каждому параметру имеется широкий разброс имеющихся измерений.

В камере IR2 при работе с фильтром 2.26 мкм использовались в основном экспозиции 6.97 с, пропускание фильтра 0.67, ширина полосы 0.052 мкм, центр 2.27 мкм. Угловой размер поля единичного пиксела составлял $1.98286 \cdot 10^{-4}$ рад, насыщение достигалось при яркости протяженного источника $664 \text{ мВт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. На поверхности облачного слоя на рис. 6 размер поля составлял 29×29 км, а на рис. 9 – 19×19 км.

Камера IR2 была калибрована в яркостях протяженной поверхности. Расчет яркости построен на модели земной молнии, основанной на приведенных выше данных.

Предполагается, что состояние элемента матрицы определялось энергией, поглощенной в течение экспозиции. Поэтому поле пиксела регистрировалось как элемент осредненной яркости протяженного источника и выражалось в единицах $\text{мВт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, независимо от того, какую часть поля пиксела S занимала вспышка ΔS . Принималось, что среднее поле пиксела составляет квадрат 24×24 км. Естественно, сама вспышка была намного ярче. Чтобы перейти к ее свойствам, необходимо учесть фактор ΔS . У земных молний вспышка состоит из нескольких коротких экспоненциально затухающих разрядов, каждый по 50–100 мкс,

Таблица 1. Земные молнии

Протяженность канала молнии облака – земля	1–10 км, максимальная зарегистрированная 321 км
Разветвленные каналы молнии облако – облако, суммарная протяженность ветвлений	30 км и более
Диаметр канала-лидера	до 4 м
Диаметр канала основного разряда	5–50 см
Длительность разряда	0.2–0.4 с, реже до 1.5 с, max 7.74 с
Ток в разряде	10–300 кА, в 50% случаев около 20 кА
Разность потенциалов облако – земля при грозе	10^6 – 10^9 В, max $1.6 \cdot 10^{12}$ В
Температура в канале разряда	средняя 9500 К, max до 30 000 К
Отношение излучения черного тела в полосе 2.26 мкм к полной излучаемой мощности (температура в канале $T = 10\,000$ К)	0.015 (на полосу 1 мкм)
Излучение канала в оптическом диапазоне	870 Дж/м

с общей длительностью Δt от 0.2 до 1 с. Вспышка межоблачной молнии образует многочисленные ветвления, которые суммарно могут достигать нескольких десятков километров. Ветвления не обязательно строго синхронные. Суммарная длина ветвлений разряда принята равной размеру пиксела, 24 км, диаметр канала 0.2 м, отношение $\Delta S/S = 0.833 \cdot 10^{-6}$. Длительность экспозиции $\tau = 7$ с, Δt принято 0.3 с. Отношение $\Delta t/\tau = 0.043$ характеризует ослабление вспышки, отнесенной к длительности экспозиции. Ослабление за счет пропускания фильтра учтено в калибровочных данных камеры. Высокая яркость точечных источников на рис. 5–7, которая предполагает разрывы плотного облачного слоя, конечно, не исключает экстинкции над разрывами, которая в диапазоне 2.26 мкм невелика, около 0.2 км^{-1} , по опубликованным данным. Температура канала молнии принималась $T = 10\,000 \text{ К}$. Точная функция источника неизвестна, но спектр излучения близок

к чернотельному. Излучение рассчитывалось с помощью функции Планка для длины волны $\lambda = 2.26 \text{ мкм}$. Как показано на рис. 6 и 7, вспышки регистрировались в насыщении (яркость $B_{2.26}$ более $664 \text{ мВт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$). Таким образом, если молнии на Венере имеют такие же характеристики, как на Земле, то расчетное значение $B_{2.26}$ должно несколько превышать указанную величину. Именно на это и указывает расчет по формуле Планка:

$$B_{2.26} = (\Delta S/S) \cdot (\Delta t/\tau) \cdot C_1/\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1] = 803 \text{ мВт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}.$$

Совпадение экспериментальных и расчетных значений не может быть случайным и подтверждает, что на снимках рис. 5–9 зарегистрированы именно разряды молний. Разумеется, принятые характеристики модели молнии можно варьировать. Энергия, выделяемая в разряде земных молний, оценивается в широких пределах, от $3 \cdot 10^{10}$ до 10^{14} Дж (от 10^4 А и 10^7 В до

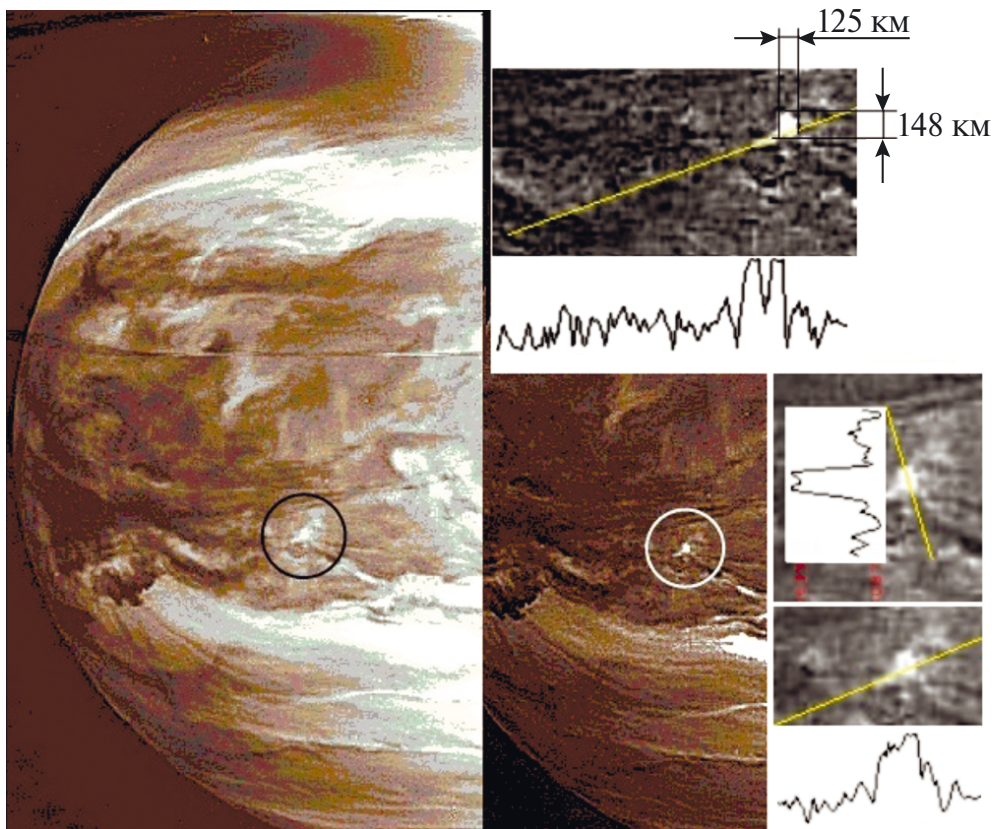


Рис. 10. Отдельные неповторяющиеся точечные детали, некоторые с лучами, обладают высокой яркостью, вплоть до уровня насыщения детектора. Предположительно, их можно отнести к глубоким разрывам облачной среды или к вспышкам супермолний. Яркость вдоль наклонных линий на фрагментах изображений показана диаграммами. Седловина на максимуме графиков обычно указывает на достигнутый уровень насыщения детектора. Снимок сделан камерой IR2 25.III.2016 г. в 07:33:33 UTC.

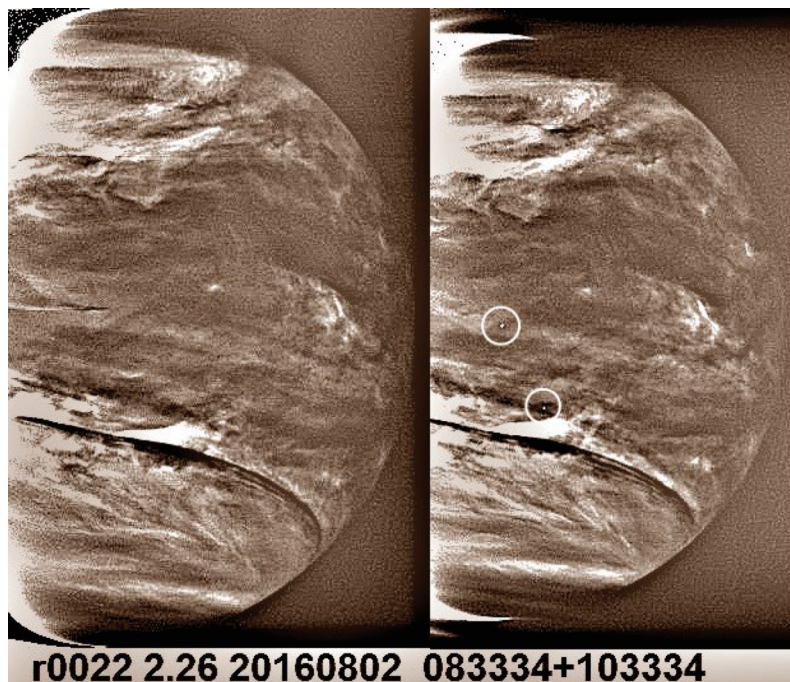


Рис. 11. Яркие точечные объекты имеют размеры около 30–50 км. Пара изображений позволяет сопоставить два снимка, полученных камерой IR2 2.VIII.2016 в 08:33:34 и 10:33:34 UTC, с яркими, до уровня насыщения детектора, мелкими деталями, отсутствующими на левом снимке.

$3 \cdot 10^5$ А и 10^9 В). Вероятно, при общем сходстве то же можно утверждать об энергии, рассеиваемой в разряде молнии Венеры. Что же касается максимальных значений, возможно, они относятся к одиночным объектам, рассматриваемым в следующем разделе.

ОДИНОЧНЫЕ ОБЪЕКТЫ – ТОЧЕЧНЫЕ РАЗРЫВЫ В ОБЛАКАХ ИЛИ СУПЕРМОЛНИИ?

Группы частых вспышек, соответствующие результатам ЭМ-экспериментов, долго не удавалось найти, и вначале поиск был перенаправлен на признаки отдельных разрядов типа земных супермолний с огромной мощностью в разряде, до 10^3 ГВт и более [17, 18]. Такие явления выби-
рались из сравнения последовательных снимков как четкие, но неповторяющиеся детали, иногда с лучами (рис. 10 и 11).

Яркое пятно на рис. 10, в черном кружке, имеет размеры 5–7 пикселей (120–150 км). Средняя длина земной молнии – несколько километров, но максимальная зарегистрированная – более 300 км [17, 18]. Пятно на рис. 10 обладает высокой яркостью, вплоть до насыщения детектора,

что показано наклонными сечениями на рисунке. Учитывая, что столь высокая яркость наблюдалась у пятна площадью $1.5 \cdot 10^4$ км², предположительно, можно отнести это пятно к рассеянному излучению от вспышки супермолнии. Яркость вдоль наклонных линий на фрагментах изображений показана диаграммами, указывающими на насыщение детектора. Но возможно и другое происхождение пятна – локальный разрыв в облаках протяженностью до 150 км. Тогда высокая яркость является следствием высокой температуры излучающей среды. Авторы работы [14] рассматривали возникающие нисходящие потоки, создающие «прозрачные окна». Возможно, такие локальные «окна» могли бы возникнуть в нисходящих потоках.

В работе с камерой IR2 иногда удавалось получить серию снимков облачного покрова Венеры с интервалом по 2 ч, что позволяло проследить эволюцию облачной структуры. К сожалению, снимок r0011 20160325 073333, 2.26 мкм (орбита аппарата r0011, 25.III.2016, начало экспозиции 7 ч 33 мин 33 с), приведенный на рис. 10, – одиночный, последующих снимков за 25 марта нет.

По сравнению с рис. 10 труднее предположить, что яркие неповторяющиеся детали очень

малых размеров, 2–3 пиксела (около 50 км), тоже могут быть «локальными окнами». Как уже отмечалось, светлые детали рисунка соответствуют меньшей плотности поглощающей среды, а узкая темная полоса в нижней части рисунка, возможно, указывает на плотный опоясывающий поток глобальной протяженности. Можно напомнить, что, обобщая результаты телевизионных экспериментов на поверхности Венеры, Селиванов и соавторы [23] отмечали 20–25%-ные изменения освещенности у поверхности, произошедшие за 30 мин, что можно связать с локальными прояснениями или разрывами в облаках [14].

Возникновение глубокого точечного разрыва в облаках (рис. 11) объяснить сложно. Выделенная деталь могла бы быть одиночной супермолнией. Яркие точечные источники отмечены белыми кружками на рис. 11. Снимки были получены 2.VIII.2016 г. Точечные объекты присутствуют только на втором снимке.

Найдено около 10 объектов, подобных показанным на рис. 10 и 11. Интересные сами по себе, они тем не менее не согласуются с высокой частотой (скоростью счета) электромагнитных импульсов на рис. 3. Если происхождение группы ярких точек на рис. 5 и 7 ничем, кроме молний, объяснить не удастся, то одиночные элементы изображения на рис. 10 и 11 можно было бы отнести и к супермолниям, и к точечным разрывам, возникшим неизвестным образом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассеивающие свойства облачной среды Венеры в интервале высот 49–57 км значительно ослабляют яркость вспышек молний, возникающих, согласно рис. 2–6, в нижних слоях облаков. Поэтому уверенная регистрация вспышек возможна лишь в разрывах облаков, а немногочисленные районы ослабленного излучения вспышек можно обнаружить лишь там, где оптическая толща среды невелика.

Сопоставление результатов расчета, основанного на модели земной молнии, с измерениями, выполненными камерой IR2 миссии *AKATSUKI* на Венере, на волне 2.26 мкм, показывает практически полное совпадение экспериментальных и расчетных характеристик молний на Венере и подтверждает, что на снимках камеры IR2 миссии *AKATSUKI* зарегистрированы именно разряды молний.

Сечения на рис. 6 и 7 показывают, что все пики имеют одинаковую высоту,

определяемую уровнем насыщения детектора, $664 \text{ мВт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. Поэтому строго определить реальную яркость вспышек не представляется возможным. Тем не менее расчет указывает на величину, лишь на 20% превышающую уровень насыщения. Анализ изображения показывает также, что на прилегающей площади других вспышек практически нет, а возникновение грозы, возможно, связано с образованием разрывов и в них сосредоточено. Размытие вспышек на 4 пиксела скорее связано не с размерами вспышки, а с положением изображения вспышки на матрице относительно элементов детектора.

О природе странного *L*-объекта, показанного на рис. 5–6, можно строить разные предположения. Его упорядоченная структура и огромные масштабы (более 600 км) скорее должны быть присущи каким-то элементам геологии, а не метеорологии, например атмосферным явлениям над большим извергающимся вулканом, например, с масштабами известного извержения Тамбора. Мощная конвекция могла вызвать локальные разрывы облачного слоя и обнажения того интервала высот, где возникали молнии. Следует напомнить, что свидетельства и указания на грандиозные вулканические извержения на Венере впервые приводились еще в 1984 г. [21, 22].

Природа одиночных объектов, обладающих малыми размерами, но очень высокой яркостью, остается неизвестной. Одно из возможных предположений — одиночные супермолнии с энергией до 10^{14} Дж.

Разрывы облаков над уровнем молний, обнажающие грозовую активность, оказались на Венере глобальным явлением, но в разные даты фиксировались неодинаково. Причиной может быть как недостаточное число наблюдений и плохая сфокусированность части изображений, так и физические процессы в атмосфере планеты или их связь с периодичностью суперротации атмосферы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке грантом Президиума РАН КП19–270 «Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований».

Автор выражает благодарность профессору Хироки Кашимура (*англ.* Hiroki Kashimura) за полезные консультации относительно научной нагрузки миссии *AKATSUKI*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ксанфомалити Л. В.* Молнии в облачном слое Венеры // Космич. исслед. 1979. Т. 17. № 5. С. 747–762.
2. *Ksanfomality L. V.* Discovery of frequent lightning discharges in clouds on Venus // Nature. 1980. V. 284. P. 244–246.
3. *Scarf F. L., Taylor W. W., Russell C. T. et al.* Lightning on Venus: Orbiter detection of whistler signals // J. Geophysical Research. 1980. V. 85. P. 8158–8166.
4. *Ksanfomality L. V., Scarf F. L., Taylor W. W. L.* The electrical activity of the atmosphere of Venus; in “Venus”. Eds. by Hunten D. M. et al. University of Arizona Press, 1983. Tucson. Arizona. USA. P. 565–603.
5. *Scarf F. L., Russell C. T.* Lightning measurements from the Pioneer Venus Orbiter // Geophysical Research Letters. 1983. V. 10. P. 1192–1195.
6. *Borucki W. J.* Comparison of Venusian lightning observations // Icarus. 1982. V. 52. P. 354–364.
7. *Williams M. A., Thomason L. W.* Optical signature of Venusian lightnings as seen from space // Icarus. 1983. V. 55. P. 185–186.
8. *Croft T. A., Price G. H.* Evidence for a low altitude origin of lightning on Venus // Icarus. 1983. V. 53. P. 548–551.
9. *Lorenz R. D.* Lightning detection on Venus: a critical review // Progress in Earth and Planetary Science. 2018. Iss. 5. Art.ID. 34. <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0181-x>
10. *Takahashi Y., Yoshida J., Yair Y. et al.* Lightning detection by LAC onboard the Japanese Venus climate orbiter, Planet-C // Space Science Reviews. 2008. V. 137. P. 317–334. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9400-x>
11. *Ксанфомалити Л. В.* Низкочастотное электромагнитное поле в атмосфере Венеры по данным ВЕНЕРЫ-13 и -14 // Письма в Астрономический журнал. 1982. Т. 8. С. 424–428.
12. *Ксанфомалити Л. В.* Планета Венера. М.: Наука ФИЗМАТЛИТ, 1985. 376 с.
13. *Piccioni G., Drossart P., Suetta E. et al.* VIRTIS: The Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer // ESA Spec. Publ. 2007. SP 1295. P. 1–27.
14. *Kashimura H., Sugimoto N., Takagi M. et al.* Planetary-scale streak structure reproduced in high-resolution simulations of the Venus atmosphere with a low-stability layer // Nature communications. 2019. Iss. 10. Art. ID. 23. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07919-y>
15. *Krider E. P., Dawson G. A., Uman M. A.* Peak power and energy dissipation in a single-stroke lightning flash // J. Geophysical Research. 1968. V. 73. Iss. 10. P. 3335–3339.
16. *Uman M.* All about lightning. N.Y.: Dover Publications, 1987. 192 p.
17. *Vijayaraghavan G., Brown M., Barnes M.* Practical grounding, bonding, shielding, and surge protection. Amsterdam; London: Elsevier, Science & Technology, 2004. P. 237.
18. *Кузнецов М., Кунгуров Д., Матвеев М. и др.* Входные цепи устройств РЭА. Проблемы защиты от мощных импульсных перенапряжений // Новости электротехники. 2006. № 6 (42) С. 2–6.
19. *Ksanfomality L. V.* The surface of Mercury in the 210–350° W longitude range // Icarus. 2009. V. 200. P. 367–373. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2008.12.007>
20. *Ксанфомалити Л. В., Джапиашвили В. П., Кахиани В. О. и др.* Опыт получения изображений Меркурия методом коротких экспозиций // Астрономич. вестник. 2001. Т. 35. № 3. С. 208–213.
21. *Ксанфомалити Л. В.* Косвенные свидетельства проявления вулканизма на Венере // Астрономич. вестник. 1984. Т. 18. С. 310–320.
22. *Esposito L. W.* Sulfur dioxide: Episodic injections shows evidence for active Venus volcanism // Science. 1984. 223. 1072–1074.
23. *Селиванов А. С., Гектин Ю. М., Герасимов М. А. и др.* Продолжение телевизионного исследования поверхности Венеры со спускаемых аппаратов // Космич. исслед. 1983. Т. 21. № 2. С. 176–182. (Cosmic Research. P. 122)