

УДК 523.4-77

К. Ю. МИЛОСТНАЯ¹, В. В. ЗАХАРЕНКО¹,
 А. А. КОНОВАЛЕНКО¹, Г. ФИШЕР²,
 Ф. ЗАРКА³, М. А. СИДОРЧУК¹

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
 ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
 E-mail: milostnaya@rian.kharkov.ua

² Институт космических исследований Австрийской академии наук,
 Шмидльштрассе, 6, г. Грац, 8042, Австрия

³ LESIA, Парижская обсерватория, CNRS, UPMC,
 пл. Ж. Жансена, 5, г. Медон, 92190, Франция

ТОНКАЯ ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА МОЛНИЙ НА САТУРНЕ

Представлены первые исследования тонкой временной структуры радиоизлучения молний на Сатурне, полученные со сверхвысоким временным разрешением (единицы–сотни наносекунд). Установлено, что временная структура молний имеет два характерных масштаба: с длительностью десятки–сотни микросекунд и длительностью в единицы микросекунд. В ходе обработки данных впервые проведен анализ меры дисперсии на пути распространения сигналов молнии от шторма в атмосфере Сатурна до наземного наблюдателя.

Ключевые слова: высокое временное разрешение, молнии на Сатурне, тонкая временная структура, дисперсионная задержка, ионосфера, межпланетная среда

1. Введение

Впервые вспышечная активность, связанная с сатурнианскими штормами, была обнаружена в радиодиапазоне 0.9 ÷ 40 МГц в виде импульсных широкополосных сигналов, названных электростатическими разрядами на Сатурне (SED – Saturn Electrostatic Discharges). В 2009 г. эти сигналы были отождествлены с радиоизлучением молний в атмосфере планеты [1]. Несмотря на то, что уже более 30 лет SED являются объектом исследования ряда космических миссий (“Вояджер-1,2”, “Кассини”), до сих пор не было проведено детального изучения тонкой временной структуры этих сигналов, так как большинство исследований осуществлялось с временным разрешением порядка десятков миллисекунд. Единственные исследования SED с высоким временным разрешением (~100 мкс) были проведены по данным, полученным космическим аппаратом (КА) “Вояджер-1” [2]. Одним из существенных результатов обработки данных “Вояжера-1” стало обнаружение отдельных разрядов длительностью 1 ÷ 2 мс. Анализ немногочисленных данных КА “Кассини”, полученных с помощью бортового приемника RPWS (Radio Plasma Wave Science) с максимально возможным

временным разрешением 10 мкс, не позволил выявить новых эффектов [2].

В 2006 г. были проведены первые успешные наземные наблюдения SED на радиотелескопе УТР-2 [3]. Это послужило причиной старта длительной программы наземных наблюдений штормовой активности на Сатурне. Следующая серия наблюдений была проведена в 2007 г. с временным разрешением 20 мс [4, 5]. Их результатом стала уверенная регистрация почти тысячи SED. Благодаря тому, что наблюдения осуществлялись одновременно с КА “Кассини”, стал возможен сравнительный анализ космических и наземных данных. Их высокая степень совпадений послужила надежным основанием для дальнейшего изучения SED.

В 2010 г. наблюдался мощнейший за всю историю исследований грозовой активности на Сатурне шторм J (согласно принятой классификации [6]), сопровождавшийся высокой интенсивностью молний. К этому времени УТР-2 был оснащен новыми широкополосными малошумящими цифровыми приемниками DSPZ (Digital Spectrum Polarimeter Z modification) [7, 8, 9] с полосой записи более 20 МГц и временным разрешением (Δt) 15 нс. Успешная регистрация большого числа интенсивных сатурнианских молний за этот цикл наблюдений с таким рекордным разреше-

© К. Ю. Милостная, В. В. Захаренко, А. А. Коноваленко,
 Г. Фишер, Ф. Зарка, М. А. Сидорчук, 2014

нием позволила провести детальное исследование тонкой временной структуры SED.

В статье [2] при объяснении плоского (интенсивность SED пропорциональна частоте, $f^{-0.5}$) спектра сатурнианских молний было сделано предположение, что если временные свойства сатурнианских разрядов соответствуют земным молниям с характерной длительностью структур ~ 70 мкс, то оцениваемое значение энергии составит 10^{13} Дж. Но если считать, что SED – это разряд, состоящий из набора микроударов с гораздо более коротким характерным временем около 1 мкс, то полная энергия молнии может быть на несколько порядков ниже [2]. Вопрос до последнего времени оставался открытым.

Упомянутые выше задачи могут быть решены при исследованиях SED с временным разрешением, составляющим доли микросекунд.

Структура представленной статьи следующая: во втором разделе описаны аппаратура и схема наблюдений, проведенных в декабре 2010 г. на радиотелескопе УТР-2, показаны методы выделения SED на фоне помех. В третьем разделе анализируются полученные результаты: характерные масштабы тонкой временной структуры SED, гистограммы распределения по длительности субмиллисекундных структур SED, частотные характеристики SED. Впервые проведен анализ меры дисперсии (DM) на пути распространения радиоизлучения SED и определена средняя дисперсионная задержка сигналов. В четвертом разделе представлены выводы.

2. Аппаратура и наблюдения

С 20 по 27 декабря 2010 г. было проведено семь сеансов записи грозовой активности на Сатурне с помощью радиотелескопа УТР-2. В задачах исследования SED основным фактором является надежная идентификация сатурнианских сигналов. Для этого была использована ранее разработанная методика наблюдений, дающая возможность уверенного отождествления именно молниевых разрядов на Сатурне [3, 4, 5].

УТР-2 работал в пятилучевом режиме, что позволяло обеспечить режим “ON–OFF” [3], когда центральный луч направлен на источник, а крайний отведен от направления на источник на 1° дуги. Режим “ON–OFF” был реализован с помощью двух приемников, синхронизированных по сигналу секунды от рубидиевого стандарта.

Наблюдения проводились с использованием трех приемников DSPZ в следующих режимах работы.

Первый приемник проводил записи кросс-спектров [10] сигналов антенн “Север–Юг” (С–Ю) и “Запад–Восток” (З–В) по лучу “ON” (центральный луч, направленный на Сатурн) в полосе частот $16.5 \div 33$ МГц с временным разрешением 20 мс.

Второй приемник записывал кросс-спектры сигналов антенн С–Ю и З–В по лучу “OFF” (луч, отведенный от направления на Сатурн на 1° дуги) в полосе $16.5 \div 33$ МГц, $\Delta t = 20$ мс.

Запись кросс-спектров дает возможность анализировать не только амплитуду, но и фазу принимаемого сигнала, которая содержит информацию о направлении прихода последнего. Для помеховых сигналов и сатурнианских молний направление прихода существенно отличается. Анализируя как фазу сигнала, так и данные измерений в “ON–OFF” режиме, можно надежно выделять сигналы SED на фоне помех земного и космического происхождения [3, 10]. Пример реализации режима “ON–OFF” приведен на рис. 1. На верхней панели (в канале “ON”) присутствуют более 20 сигналов (предполагаемых SED), которые не зарегистрированы в канале “OFF” и удовлетворяют временным и спектральным критериям сатурнианских молний [4, 5].

Третий приемник работал в режиме “waveform” (прямая запись на диск оцифрованного сигнала без детектирования). Записывался сигнал суммы антенн С–Ю и З–В по лучу “ON” в полосе $0 \div 33$ МГц, $\Delta t = 15$ нс.

Длительность наблюдений в режиме записи кросс-спектра составляла $6 \div 6.5$ ч. В режиме “waveform” (из соображений экономии дискового пространства) запись велась в течение $1 \div 1.5$ ч только во время, когда шторм на лимбе планеты был обращен к наблюдателю (по данным КА “Кассини”). Контрольная запись, когда шторм был за лимбом планеты, была проведена 25.12.2010 г.

Анализ данных, полученных в режиме записи кросс-спектра, служил не только для идентификации SED. Многочасовые зависимости активности SED за каждый сеанс [11] использовались для выбора участка записей, где соотношение сигнал/шум (С/Ш) максимально. Исходя из значений С/Ш, мы определяли оптимальное временное разрешение для исследования тонкой струк-

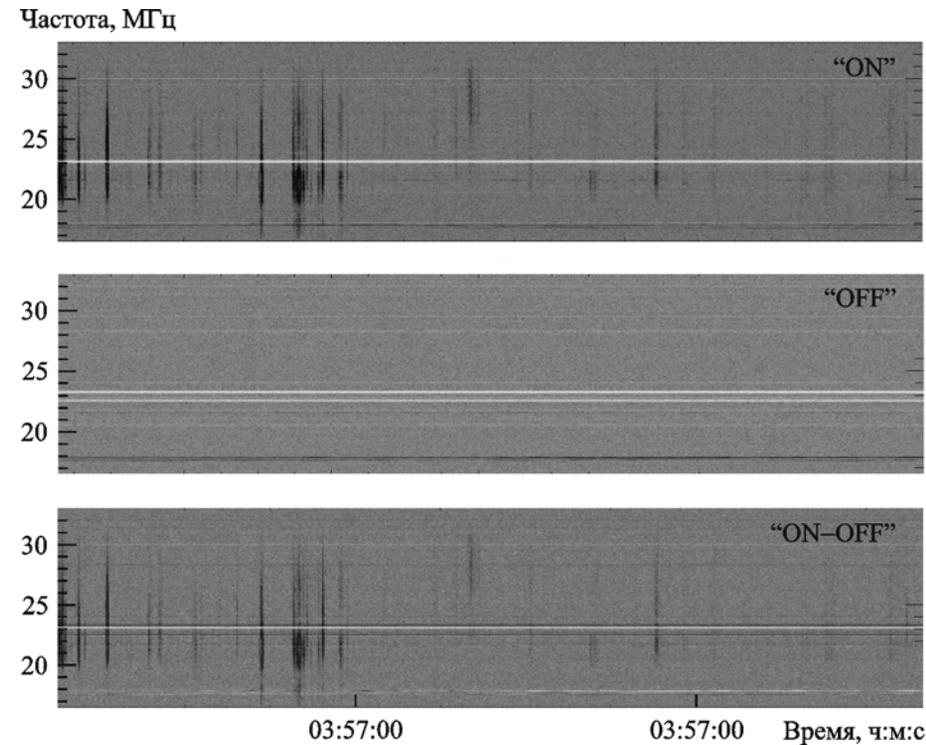


Рис. 1. Модуль кросс-спектра сигналов антенн С–Ю и 3–В для “ON” (верхняя панель) и “OFF” (средняя панель) каналов. Нижняя панель – результат вычитания, “ON–OFF”

туры радиоизлучения. Чувствительность радиотелескопа σ_s определяется по формуле:

$$\sigma_s = \frac{2kT}{A_e \sqrt{\Delta f \Delta t}}, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана, T – суммарная температура системы и яркостной температуры участка неба в направлении на источник, A_e – эффективная площадь радиотелескопа, Δf – ширина частотной полосы наблюдений, Δt – временное разрешение.

При $T = 30000$ К, $A_e = 80000$ м², $\Delta f = 16$ МГц и $\Delta t = 0.5$ мкс чувствительность телескопа $\sigma_s = 370$ Ян. Соотношение С/Ш в записях 2010 г. для отдельных сигналов было порядка 10, что позволяет исследовать временную структуру SED с разрешением 500 нс.

Таким образом, используя ранее разработанные методики наблюдения и обработки данных, мы определили участки записи, наиболее подходящие для решения поставленной задачи определения параметров тонкой временной структуры SED.

3. Результаты и обсуждение

Записи SED приемником DSPZ в “waveform” режиме позволили измерить ряд параметров сигналов SED в широком диапазоне временных масштабов. Были определены длительности характерных деталей микроструктуры молний и плотности потоков микросекундных всплесков. Построены спектры молний в частотном диапазоне 16 ÷ 31.5 МГц. В ходе работы был проведен анализ DM на пути распространения сигналов молнии от атмосферы Сатурна до радиотелескопа УТР-2.

На нижней панели рис. 2 представлен динамический спектр участка записи, содержащий молнию, которая на рис. 1 выглядит непрерывным событием с длительностью несколько десятков миллисекунд. При анализе с временным разрешением $\Delta t = 31.5$ мкс сигнал уже не является непрерывным, он состоит из последовательности коротких всплесков. В дальнейшем было установлено, что такая временная структура свойственна всем проанализированным SED. Структуры с шириной на уровне половины максимума интенсивности (FWHM – Full width at half maximum)

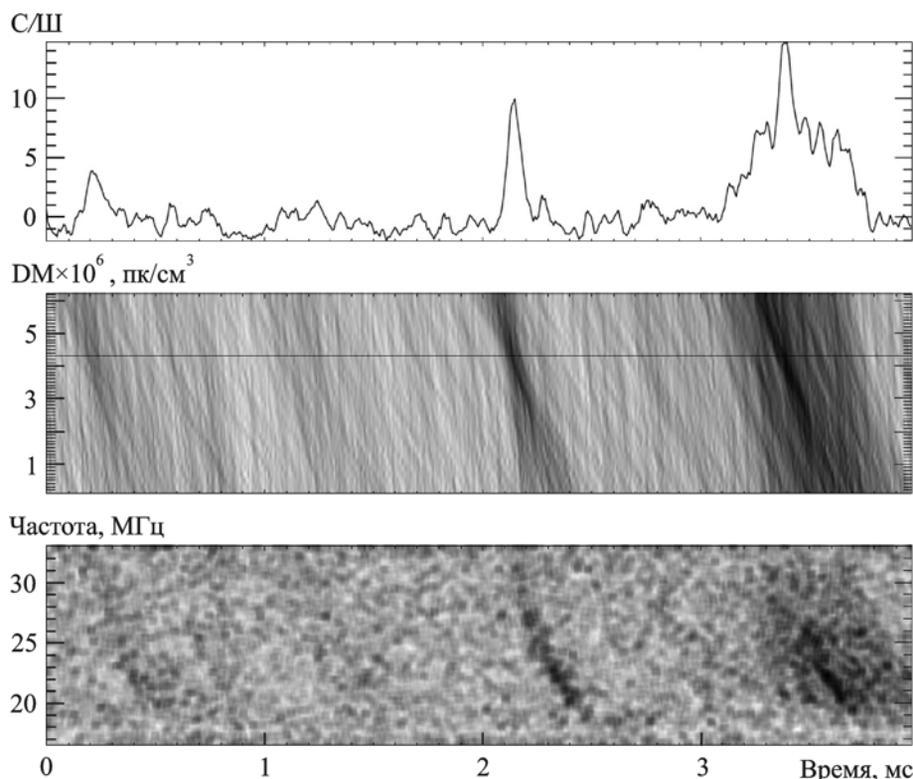


Рис. 2. Участок записи динамического спектра, содержащий молнию (нижняя панель), зависимость соотношения С/Ш от DM (средняя панель) и профиль накопленного по частоте сигнала в полосе 16.5 ÷ 33 МГц (верхняя панель)

от нескольких десятков до нескольких сотен микросекунд мы назвали субмиллисекундными.

Устранение дисперсионного запаздывания между частотными каналами позволяет существенно увеличить соотношение С/Ш. Это отчетливо видно на зависимости С/Ш от DM на средней панели рис. 2. На верхней панели рис. 2 приведен профиль накопленного по частоте сигнала в полосе 16.5 ÷ 33 МГц при максимальном соотношении С/Ш.

В соответствии с (1) чувствительность радиотелескопа пропорциональна $(\Delta t)^{-0.5}$. При исследовании длительных сигналов, увеличивая Δt , мы понижаем σ_s . В случае анализа SED с миллисекундным разрешением длительность всплеска короче временного разрешения, т. е. $t < \Delta t$, что имело место при всех предыдущих космических и наземных исследованиях молний на Сатурне. В этих случаях мощность сигнала “размазана” во всем интервале накопления с одновременным падением соотношения С/Ш в $t/\Delta t$ раз. Поэтому в исследованиях с высоким временным разрешением, когда $t \approx \Delta t$, может быть проведено максимально точное измерение интенсивности сигнала.

Мы использовали различные значения итогового временного разрешения (путем суммирования исходных отсчетов с $\Delta t = 15$ нс). Для задач, направленных на исследования долгопериодических изменений штормовой активности, мы использовали более грубое временное разрешение, с накоплением $10^3 \div 10^6$ отсчетов. При изучении тонкой временной структуры молний мы выбрали значение Δt , соответствующее накоплению 32 отсчетов.

3.1. Детектирование SED

Как и в предыдущих работах [4, 5], детектирование молний в данных с высоким разрешением проводилось автоматически с помощью специально разработанных программ на основе многоканальной методики [4]. Суть методики состоит в разбиении частотного диапазона на субполосы шириной ~ 0.5 МГц, в которых происходит поиск. Превышение сигналом заранее установленного порога (это – первый параметр поиска, значение порога лежит в пределах $3 \div 6 \sigma_s$) одновременно в двух и более субполосах (второй параметр) означает успешное детектирование SED. Для данных с высоким разрешением потребовалась мо-

дификация параметров поиска, что связано со следующими причинами:

- дисперсионная задержка сигналов SED в межпланетной среде может быть в несколько раз больше, чем длительность структур молнии;
- всплеск состоит из набора коротких пиков, между которыми интенсивность сигнала, как правило, ниже значения $3\sigma_s$;
- длительность молнии у нижней и верхней границы частотного диапазона может существенно отличаться.

На первоначальном этапе обнаружения SED временное разрешение было выбрано равным 31.5 мкс (2048/66000000, где 2048 – количество накопленных спектров, а 66 МГц частота оцифровки [8]), что связано с предполагаемым априори [2] характерным масштабом тонкой структуры 70 мкс.

Для устранения дисперсионной задержки была применена постдетекторная методика компенсации, не требующая больших вычислительных затрат. На последующих этапах, когда объем обрабатываемых данных составлял только несколько гигабайт, была использована додетекторная компенсация задержки сигналов [12], позволяющая получать исходное аппаратное временное разрешение 15 нс. В ходе работы был проведен анализ дисперсионных задержек для выборки самых мощных и самых широкополосных всплесков.

3.2. Мера дисперсии

Дисперсионная задержка сигналов SED связана с распространением сигнала в трех ионизированных средах: ионосфере Сатурна, ионосфере Земли и межпланетной среде. Расчет DM для данных сигналов проводился по найденной временной задержке (T) между минимальной (f_{\min}) и максимальной (f_{\max}) частотами рабочего диапазона [13]:

$$DM = \frac{2.410331T}{(f_{\min}^{-2} - f_{\max}^{-2}) \cdot 10^{16}}.$$

Мы провели оценки ожидаемой DM для наблюдений наиболее интенсивных молний исходя из следующих данных:

- средних значений дневной плотности и высоты ионосферы Сатурна [11], а также среднего расстояния источника от верхнего края облаков [1];
- полного электронного содержания в ночной ионосфере Земли над телескопом УТР-2 [14],

с учетом зенитного угла (в среднем около 55° для Сатурна);

- пересчитанных в значение электронной концентрации на луче зрения от Земли до Сатурна значений плотности и скорости солнечного ветра на орбите Земли, полученных в течение 50 суток [15].

Соответствующие значения DM равны $4.5 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$ и $3 \cdot 10^{-5}$ пк/см³, а полная DM $\sim 3.7 \cdot 10^{-5}$ пк/см³. Наши оценки пределов значений DM, в которых может изменяться вклад всех трех компонент, сделанные на основании данных о вариациях электронной концентрации, составляют:

$DM_{\text{Earth}} = 1 \div 5 \cdot 10^{-6}$ пк/см³ для ионосферы Земли;

$DM_{\text{Saturn}} = 0.4 \div 4 \cdot 10^{-6}$ пк/см³ для ионосферы Сатурна;

$DM_{\text{IPM}} = 5 \div 100 \cdot 10^{-6}$ пк/см³ для межпланетной среды.

При когерентном (додетекторным) дедиспергировании мы задавали пределы поиска $10^{-6} \div 10^{-4}$ пк/см³ с шагом 10^{-6} пк/см³. Для 96 наиболее интенсивных молний, при определении временной задержки в частотном диапазоне 19 ÷ 25 МГц, среднее значение DM составило $43 \cdot 10^{-6}$ пк/см³ (временная задержка сигнала при этом составляет в среднем 216 мкс в этом диапазоне), а среднеквадратическое отклонение – $6 \cdot 10^{-6}$ пк/см³. Гистограмма распределения определенных нами значений DM приведена на рис. 3.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы. Среднее значение DM хорошо согласуется с предварительными оценками. Большой разброс и быстрые вариации DM трудно объяснить, имея в виду достаточную стабильность средних параметров сред, в которых распространяется сигнал.

Из анализа выбранных мощных молний, можно сделать вывод, что, как правило, всплески, объединенные в последовательную серию, имеют одинаковые или очень близкие временные задержки, тогда как для разнесенных во времени сигналов значения задержек могут отличаться более чем в 2 раза. Изменение DM происходит за доли или единицы секунд. По нашему мнению, это может быть вызвано двумя причинами. Одной из них являются вариации плотности межпланетной плазмы. Наиболее вероятно, что изменение DM происходит вблизи орбиты

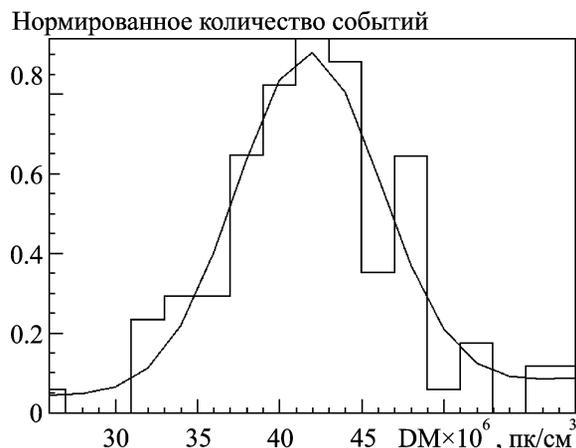


Рис. 3. Гистограмма распределения молний по значениям DM. Сплошной кривой показана аппроксимация полученного распределения комбинацией функции Гаусса и квадратичной функции

Земли, поскольку здесь межпланетная плазма имеет наибольшую плотность и ее вариации будут сказываться максимально. С другой стороны, ионосфера Сатурна очень динамична. И поэтому для двух молний, разнесенных на тысячи километров [16] в атмосфере, среда распространения может характеризоваться различными значениями DM. Поэтому, второй причиной могут являться локальные неоднородности концентрации электронов в ионосфере Сатурна.

Исходя из того, что изменения DM зависят от большого числа случайных факторов, мы предполагаем, что распределение DM должно описываться законом, близким к нормальному. Однако имеющаяся у нас выборка невелика (96 событий). Полученное нами распределение (см. рис. 3) имеет несколько асимметричную форму.

Анализ SED с временным разрешением $10^{-6} \div 10^{-5}$ с показал, что устранение дисперсионной задержки является обязательным пунктом предварительной обработки данных для анализа тонкой структуры SED. Кроме того, определение DM по дисперсионным задержкам сигналов молний может обеспечить анализ динамики электронной плотности в межпланетной среде в течение малых промежутков времени – минуты и секунды.

3.3. Распределение компонент тонкой структуры молний по их длительности

Впервые нами было построено распределение по длительности не только для молний с временем существования несколько десятков–сотен

миллисекунд, но и для их внутренних микросекундных временных структур. С помощью многоканального алгоритма (п. 3.1) было выделено более 4000 всплесков (для ~ 250 молний) с длительностями от 2 до 50 мкс. На рис. 4 для этой выборки приведено распределение компонент тонкой структуры молний по их длительности. Приведены также две аппроксимации функций вида $\exp(-t/t_{ch})$, где t_{ch} – характеристическое время [4, 17].

Важным результатом является обнаружение излома (в окрестности 20 мкс) в гистограмме на рис. 4, который свидетельствует о наличии компонент с различными длительностями. Аппроксимации более крутой и более пологой части распределения дают различные значения характеристического времени: 3.5 мкс для левой части на графике, и 18 мкс – для правой. Это указывает на сложную временную структуру SED.

3.4. Исследование микросекундной структуры SED

Для анализа были выбраны 96 структур отдельных молний с длительностями в интервале от 30 до 310 мкс. Несмотря на то, что сигналы SED представляют собой спорадическое нерегулярное излучение, для повышения соотношения С/Ш мы провели их усреднение. На рис. 5 представлены результаты усреднения по выборке при анализе с временными разрешениями 31.5 мкс (верхняя панель) и 2 мкс (нижняя панель). Поскольку дли-

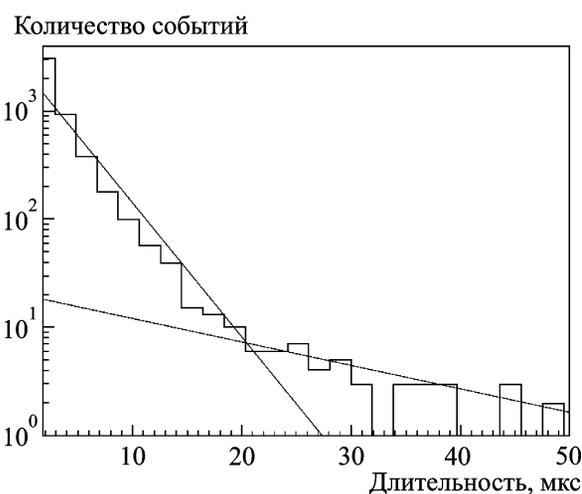


Рис. 4. Гистограмма распределения по длительности микросекундных структур молнии, полученная при временном разрешении 2 мкс. Прямыми показаны аппроксимации функциями вида $\exp(-t/t_{ch})$, $t_{ch} = 3.5$ и 18 мкс

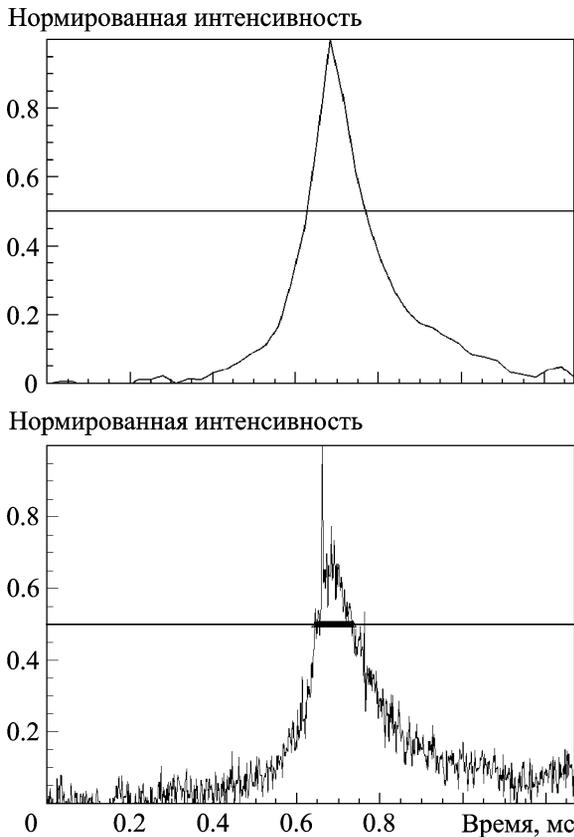


Рис. 5. Средний нормированный профиль субмиллисекундных структур SED при анализе с временным разрешением 31.5 мкс (верхняя панель) и 2 мкс (нижняя панель). Горизонтальной линией обозначен уровень половины максимума интенсивности вспышки

тельность молний изменяется в широких пределах, мы использовали при усреднении передний фронт молнии (на уровне половины максимума интенсивности FWHM) как нулевую точку отсчета. При $\Delta t \approx 31.5$ мкс был получен усредненный профиль молнии с FWHM, равным 150 мкс. При $\Delta t \approx 2$ мкс средняя длительность составила 142 мкс. Несмотря на близкие значения параметра FWHM, профили отличаются: при более высоком временном разрешении обнаруживается еще один масштаб структуры SED.

На нижней панели (рис. 5) видно, что средний профиль молний имеет характерную особенность – началом разряда является пик с длительностью менее 10 мкс. Далее в молнии подобные пики могут появляться в случайное время (при усреднении они сглаживаются), и достаточно гладкий профиль отражает уже другую структуру – субмиллисекундную.

Таким образом, структура молнии оказывается достаточно сложной, имеющей компоненты различной длительности: от десятков и сотен миллисекунд до единиц микросекунд. Для того чтобы убедиться в отсутствии еще более коротких составляющих тонкой структуры, мы провели анализ с временным разрешением 500 нс.

3.5. Исследование SED с временным разрешением 500 нс

Для поиска самых коротких временных структур SED были выбраны самые мощные события и построены их временные профили с $\Delta t \approx 500$ нс (32/66000000). Пример такого участка молнии представлен на рис. 6.

При таком временном разрешении видна тонкая структура сигнала, который состоит из коротких (длительностью несколько отсчетов) пиков. Был проведен поиск неразрешенных событий: отсчетов, после которых интенсивность падает не менее чем в e раз, оставаясь при этом выше значения $3\sigma_s$. Подобных пиков обнаружено не было. Таким образом, можно утверждать, что в наших данных все наиболее интенсивные события были разрешены.

При достижении временного разрешения, равного длительности самых коротких элементов тонкой структуры, мы можем оценить пиковое значение плотности потока излучения молнии. Для самых мощных событий оно находится в диапазоне $4000 \div 5000$ Ян. Следует сказать, что это значение всего в несколько раз превышает не только плотность потока, определенную при временном разрешении 20 мс для гигантского шторма J ($1500 \div 2000$ Ян), но и плотность потока максимально интенсивных вспышек шторма E (700 Ян) [3]. А значит, существует возможность того, что интенсивность некоторых молний будет достаточно для ее детектирования с высоким временным разрешением для каждого шторма и, следовательно, для измерения тонкой структуры молний и DM межпланетной среды.

3.6. Средний спектр

Поскольку SED наблюдаются КА “Кассини” в частотном диапазоне от 25 кГц до 16 МГц [17], исследование данных УТР-2 в диапазоне $16 \div 33$ МГц дополняют космические исследования. Спектр SED (рис. 7) выше 20 МГц достаточно хорошо описывается законом $f^{-1.2}$.

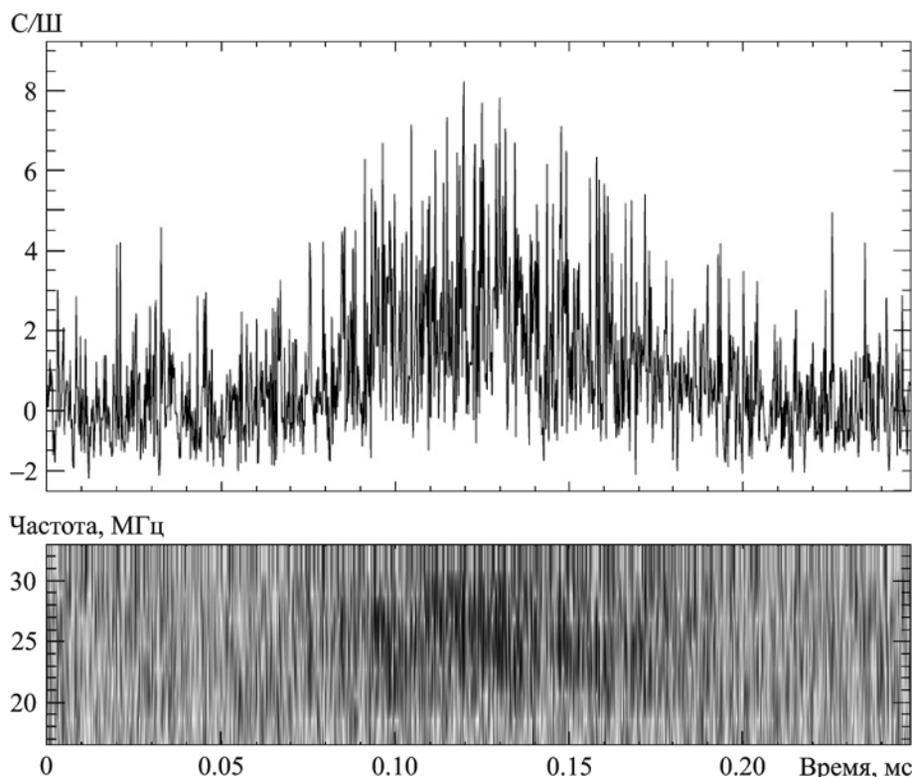


Рис. 6. Профиль сигнала (верхняя панель) и спектрограмма с временным разрешением 500 нс (нижняя панель)



Рис. 7. Спектр SED в полосе 16 ÷ 31.5 МГц. Прямой показана аппроксимация функцией $f^{-1.2}$

Таким образом, результаты исследования спектра SED в диапазоне 20 ÷ 31.5 МГц с помощью радиотелескопа УТР-2 находятся в хорошем соответствии с данными КА “Вояджер-1, 2” (в диапазоне 20 ÷ 40 МГц наблюдается спад интенсивности излучения пропорционально $f^{-1.2}$ [18]). Участок спектра в области частот ниже 20 МГц

подлежит более детальному и тщательному анализу при будущих исследованиях.

4. Выводы

Наземные наблюдения с временным разрешением вплоть до 15 нс позволили впервые исследовать тонкую временную структуру SED и определить ее характерные масштабы. По данным, полученным в работе, было установлено, что тонкая временная структура SED (шторм J) содержит два характерных масштаба: с характеристическими временами 3.5 мкс и 18 мкс. Кроме того, длительности субмиллисекундных структур молний лежат в диапазоне 30 ÷ 310 мкс.

Впервые получены следующие временные и частотные параметры компонент тонкой структуры SED: средний спектр, плотность потока излучения, характеристическое время и средняя длительность. Впервые установлено, что началом разряда является пик с длительностью менее 10 мкс.

В ходе обработки данных впервые проведен анализ DM на пути распространения сигналов молнии от шторма в атмосфере Сатурна до на-

земного наблюдателя. Среднее значение DM составило $43 \cdot 10^{-6}$ пк/см³ при определении временной задержки в частотном диапазоне 19 ÷ 25 МГц.

Полученные результаты являются базой для дальнейших исследований SED, в том числе и для сравнения характеристик земных и сатурнианских молний. Следует подчеркнуть, что исследование микросекундных временных масштабов планетарных молний в дециметровом диапазоне в настоящее время осуществляется только с использованием наземных средств, в частности, радиотелескопа УТР-2. Разработанные методики поиска и анализа SED являются универсальными и могут быть использованы и для исследований молний в атмосферах других планет Солнечной системы.

Представленная работа частично поддержана проектом ANR NT05-1 42530 “Radio-Exopla” и грантом PICS 1.33.11. Исследования по данным КА Кассини в LESIA поддерживаются CNES (Национальный центр космических исследований Франции). Работа проведена также при поддержке Национальной академии наук Украины и Российского фонда фундаментальных исследований (украинско-российский проект, 2012 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dyudina U. A., Ingersoll A. P., Ewald S. P., Porco C. C., Fischer G., Kurth W. S., and West R. A. Detection of visible lightning on Saturn // *Geophys. Res. Lett.* – 2010. – Vol. 37, No. 9. – id. L09205.
2. Farrell W. M., Kaiser M. L., Fischer G., Zarka P., Kurth W. S., and Gurnett D. A. Are Saturn electrostatic discharges really superbolts? A temporal dilemma // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – Vol. 34, Is. 6. – id. L06202.
3. Konovalenko A. A., Kalinichenko N. N., Rucker H. O., Lecacheux A., Fischer G., Zarka P., Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Grießmeier J.-M., Abranin E. P., Falkovich I. S., Sidorchuk K. M., Kurth W. S., Kaiser M. L., and Gurnett D. A. Earliest recorded ground-based decimeter wavelength observations of Saturn’s lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006 // *Icarus*. – 2013. – Vol. 224, No. 1. – P. 14–23.
4. Zakharenko V., Mylostna K., Konovalenko A., Zarka P., Fischer G., Grießmeier J.-M., Litvinenko G., Rucker H., Sidorchuk M., Ryabov B., Vavriv D., Ryabov V., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Fabrice C., Pallier L., Schneider J., Kozhyn R., Vinogradov V., Mukha D., Weber R., Shevchenko V., and Nikolaenko V. Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn // *Planet. Space Sci.* – 2012. – Vol. 61, No. 1. – P. 53–59.
5. Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Fischer G., Konovalenko A. A., Zarka P., Grießmeier J.-M., Ryabov B. P., Vavriv D. M., Ryabov V. B., Rucker H., Ravier P., Sidorchuk M. A., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Fabrice C., Kozhyn R. V., Mukha D. V., Pallier L., Schneider J., Shevchenko V. A., Vinogradov V. V., Weber R., and Nikolaenko V. S. Identification of Saturn Lightnings Recorded by the UTR-2 Radio Telescope and Cassini Spacecraft // *Radio Physics and Radio Astronomy*. – 2011. – Vol. 2, Is. 2. – P. 93–98.
6. Fischer G., Kurth W. S., Gurnett D. A., Zarka P., Dyudina U. A., Ingersoll A. P., Ewald S. P., Porco C. C., Wesley A., Go C., and Delcroix M. A giant thunderstorm on Saturn // *Nature*. – 2011. – Vol. 475, No. 7354. – P. 75–77.
7. Kozhin R. V., Vinogradov V. V., and Vavriv D. M. Low-noise, high dynamic range digital receiver/spectrometer for radio astronomy applications // *Proc. SMW’07 Symposium*. – Kharkiv (Ukraine). – 2007. – P. 736–738.
8. Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R., Vinogradov V. V., and Denis L. A low-noise, high-dynamic range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz // *Astron. Astrophys.* – 2010. – Vol. 510. – id. A16.
9. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Rucker H. O., Lecacheux A., Zarka P., Koliadin V. L., Zakharenko V. V., Stanislavsky A. A., Melnik V. N., Litvinenko G. V., Gridin A. A., Bubnov I. N., Kalinichenko N. N., Reznik A. P., Sidorchuk M. A., Stepin S. V., Mukha D. V., Nikolajenko V. S., Karlsson R., and Thide B. New antennas and methods for the low frequency stellar and planetary radio astronomy // *Proc. of PRE VII*. – Graz (Austria). – 2010. – P. 521–531.
10. Колядин В. Л. Использование фазовых динамических кросс-спектров для широкополосных радиоастрономических наблюдений: опыт применения на радиотелескопе УТР-2 // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2011. – Т. 16, № 4. – С. 341–354.
11. Милостная К. Ю., Захаренко В. В. Поиск и исследование грозовой активности на Сатурне и других планетах Солнечной системы // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 12–25.
12. Hankins T. H. Microsecond intensity variations in the radio emissions from CP 0950 // *Astrophys. J.* – 1971. – Vol. 169. – P. 487–491.
13. Backer D. C., Hama S., Hook S. V., and Foster R. S. Temporal variations of pulsar dispersion measures // *Astrophys. J.* – 1993. – Vol. 404. – P. 636–642.
14. Открытая база данных. CODE’s global ionosphere maps. Available from: <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/2012/>
15. Открытая база данных. News and information about the Sun-Earth environment. Available from: <http://spaceweather.com/>
16. Открытая база данных. Jet Propulsion Laboratory, Cassini Solstice mission. A new: Lightning Flashing on Saturn. Available from: <http://saturn.jpl.nasa.gov>
17. Dyudina U. A., Ingersoll A. P., Ewald S. P., Porco C. C., Fischer G., Kurth W., Desch M., Del Genio A., Barbara J., and Ferrier J. Lightning storms on Saturn observed by Cassini ISS and RPWS during 2004–2006 // *Icarus*. – 2007. – Vol. 190, Is. 1. – P. 545–555.
18. Fischer G., Dyudina U. A., Kurth W. S., Gurnett D. A., Zarka P., Barry T., Delcroix M., Go C., Peach D., Vandenberg R., and Wesley A. Overview of Saturn lightning observations. H. O. Rucker, W. S. Kurth, P. Louarn, and G. Fischer, editors. *Planetary Radio Emissions VII*. – Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 2011. – P. 135–144.

К. Ю. Милостна¹, В. В. Захаренко¹, О. О. Коноваленко¹,
Г. Фішер², Ф. Зарка³, М. А. Сидорчук¹

¹Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

²Інститут космічних досліджень Австрійської академії наук,
Шмідльштрассе, 6, м. Грац, 8042, Австрія

³LESIA, Парижська обсерваторія, CNRS, UPMC,
пл. Ж. Жансена, 5, м. Медон, 92190, Франція

ТОНКА ЧАСОВА СТРУКТУРА БЛИСКАВОК НА САТУРНІ

Надаються перші дослідження тонкої часової структури радіовипромінювання блискавок на Сатурні, отримані з надвисоким часовим розділенням (одиниці—сотні наносекунд). Встановлено, що часова структура блискавок має два характерних масштаби: з тривалістю сотні—десять мікросекунд і з тривалістю в одиниці мікросекунд. Під час обробки даних вперше виконано аналіз міри дисперсії на шляху поширення сигналів блискавки від шторму в атмосфері Сатурна до земного спостерігача.

K. Y. Mylostna¹, V. V. Zakharenko¹, A. A. Konovalenko¹,
G. Fisher², P. Zarka³, and M. A. Sidorchuk¹

¹Institute of Radio Astronomy, National Academy
of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

²Institut für Weltraumforschung der Österreichischen
Akademie der Wissenschaften,
6, Schmiedlstrasse, Graz, 8042, Austria

³LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC,
5, Place Jules Janssen, Meudon, 92190, France

FINE TIME STRUCTURE OF LIGHTNINGS ON SATURN

The results are reported of the very first study of Saturn lightning fine time structure with superfine time resolution (within hundreds to units of nanoseconds). It is ascertained that the lightning time structure has two intrinsic scales: from hundreds/tens to units of microseconds. The analysis was first made of dispersion measure on the Saturn lightning signals' path from storm in the atmosphere of Saturn to ground-based telescope.

Статья поступила в редакцию 09.12.2013