

Идентификация молний на Сатурне, зарегистрированных радиотелескопом УТР-2 и космическим аппаратом “Кассини”

В. В. Захаренко, К. Ю. Милостная, Г. Фишер³, А. А. Коноваленко, Ф. Зарка¹, Ж.-М. Гриссмейер², Б. П. Рябов, Д. М. Ваврив, В. Б. Рябов⁴, Х. Рукер⁵, П. Равье⁶, М. А. Сидорчук, Б. Цекони², А. Коффри⁷, Л. Дени⁷, К. Фабрис⁷, Р. В. Кожин, Д. В. Муха, Л. Палье², И. Шнейдер⁸, В. А. Шевченко, В. В. Виноградов, Р. Вебер⁶, В. С. Николаенко

Радиоастрономический Институт НАНУ, ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина

¹Париж-Медон обсерватория, Париж, CNRS UMR 8644, LESIA, Франция

²ASTRON, Двингелоо, Нидерланды

³Университет Айовы, Айова, США

⁴Департамент комплексных систем, Хакодата, Хокайдо, Япония

⁵Институт космических исследований, Грац, 8042, Шмидельштрассе, 6, Австрия

⁶LESI, Орлеанский университет, Франция

⁷Радиоастрономическая станция, Нанси, Франция

⁸Париж-Медон обсерватория, Париж, LUTH, Франция

Статья поступила в редакцию 19 марта 2010 г.

Работа посвящена исследованию электростатических разрядов на Сатурне (Saturn Electrostatic Discharges – SED) по данным одновременных наблюдений начального периода шторма F на радиотелескопе УТР-2 и космическом аппарате “Кассини”. Записи на УТР-2 проводились с помощью спектрального приемника в полосе 12 ÷ 33 МГц, а на аппарате “Кассини” – последовательным спектроанализатором RPWS (Radio Plasma Wave Science) в полосе 1.8 ÷ 16 МГц. В результате обработки была получена высокая степень совпадения наземных измерений и данных, полученных на аппарате “Кассини”. Определено характеристическое время SED и его зависимость от интенсивности эпизода в начальный период шторма F.

1. Введение

После двадцати пяти лет изучения электростатических разрядов на Сатурне (SED – Saturn Electrostatic Discharges) с помощью космических аппаратов (КА) были проведены первые успешные наземные наблюдения на радиотелескопе УТР-2. Их результатом стала однозначная регистрация наземными радиоастрономическими средствами 70 событий [1]

в период шторма E, длившегося около месяца в январе–феврале 2006 г. [2].

Успех первых наземных наблюдений послужил причиной старта длительной программы исследований следующего (девятого по счету) шторма F. Он начался 27 ноября 2007 г. после 21-месячного периода “молчания”. Длительность шторма F была рекордной – около 8 месяцев (до 15 июля 2008 г.) и включала более 400 эпизодов (эпизодом счи-

тается оборот Сатурна с регистрацией радиоизлучения SED).

Разработанная в 2005–2007 гг. в связи с интенсивной модернизацией всего приемного комплекса радиотелескопа УТР-2 регистрирующая широкополосная аппаратура по ряду параметров превосходит спектроанализатор последовательного типа RPWS (Radio Plasma Wave Science) [3] КА “Кассини” (напомним, что КА “Кассини” был выведен на орбиту 15 октября 1997 г.). Наземные наблюдения, проводимые с помощью новой радиоприемной аппаратуры, открывают возможность более детального изучения SED как во временной, так и в частотной области за счет достижения высокого временного разрешения при одновременной записи в широком диапазоне частот.

2. Аппаратура и методы поиска SED

Учитывая редкость штормов и уникальное поведение каждого, записи проводились параллельно с помощью радиотелескопов УТР-2 и УРАН-2 с использованием ряда приемников. Наиболее информативными являются данные широкополосного приемника DSPZ [4] с полосой записи более 20 МГц и временным разрешением 2 или 20 мс и данные waveform приемника с полосой записи 3 МГц и временным разрешением 170 нс.

Поскольку в результате наблюдений получено большое количество данных, их обработка включает различные аспекты исследования, такие, как изучение энергетики SED, спектральных и временных особенностей SED на различных временных масштабах и т. п. Этим вопросам будут посвящены отдельные статьи.

Настоящая работа посвящена идентификации SED по данным одновременных наблюдений начального периода шторма F на радиотелескопе УТР-2 и КА “Кассини”. Это позволит исследовать спектральные характеристики SED в более широком частотном диапазоне, а также временные зависимости интенсивности по спектрограммам УТР-2 (с субмикросекундным временным разрешением), используя КА “Кассини” как маркер, и провести

оценку чувствительности средств наземной радиоастрономии для наблюдения подобных явлений на других планетах (Венере, Юпитере, Уране), возле которых в настоящее время нет КА.

В период с 27 ноября 2007 г. по 18 января 2008 г. было проведено несколько сеансов наблюдений. Сеансы 1–12 декабря, которые названы А1–А8 проводились с временным разрешением 20 мс. Время записи связано с суточным вращением Земли (расположение приемника) и Сатурна (расположение источника – области шторма) и, по возможности, не должно захватывать утреннее время, когда уровень помех значительно возрастает. Наибольший интерес представляют сеансы 1–5 декабря (А1–А5), во время которых регистрировалась высокая SED-активность. Сеансы 6, 8 декабря (А6, А7) были проведены в период минимума или полного отсутствия SED, а сеанс 12 декабря (А8) проходил в день, когда приемник КА “Кассини” был выключен.

Для правильной интерпретации результата сравнения наземных и космических данных необходимо учесть особенности систем регистрации RPWS и DSPZ. Последовательный спектроанализатор RPWS имеет несколько режимов работы. Полный цикл перестройки частоты занимает 16 с (“обзорный режим”) или 32 с (“поисковый режим”). Количество шагов по частоте составляет 143 в диапазоне частот $1825 \div 16025$ кГц. Номинальное время интегрирования в обзорном режиме равно 40 мс, но реальное составляет 35.2 мс – этот параметр важен для правильной оценки характеристического времени SED. В режиме обзора чистое время интегрирования, когда частоты наблюдения выше 6 МГц – критической частоты ионосферы, составляет 3.56 с за полный цикл перестройки (16 с), т. е. около 22 % времени. Коэффициент использования времени наблюдения следует учитывать для правильной оценки количества зарегистрированных SED и интенсивности молний. В другом режиме работы (при полном цикле 32 с) этот коэффициент равен 27 %.

Параллельный спектроанализатор DSPZ имеет коэффициент использования времени наблюдения 100 %. Основные потери времени

наблюдения возникают за счет искажения сигнала мощными широкополосными помехами и понижения чувствительности при возрастании уровня помех (например, в утренние часы). Априори время потерь при этом не известно, и его минимизация зависит от алгоритма обработки.

Для детектирования SED была использована методика, подробно описанная в [1]. УТР-2 работал в пятилучевом режиме, что позволяло обеспечить режим “ON-OFF”. Центральный (третий) луч, направленный на Сатурн, являлся лучом “ON”, отведенный (пятый) луч – лучом “OFF”. Критерием наличия SED является присутствие сигнала в канале “ON” и отсутствие его в “OFF”. Подобным образом использовался и сумма-разностный режим ($\Sigma - \Delta$). Запись велась по двум каналам приемников, при этом на первый канал подавалась сумма сигналов от антенн “Север-Юг” и “Запад-Восток”, а на второй – их разность. Наличие сигнала в канале суммы и отсутствие в канале разности по центральному лучу свидетельствовало о том, что излучение пришло от источника. Кроме пространственных критериев, были также использованы и уже известные по данным КА “Кассини” и КА “Вояджер” параметры длительности. В качестве предполагаемых SED отбирались события продолжительностью до 500 мс.

В условиях мощных помех естественного и искусственного происхождения только этих критериев поиска недостаточно. Дополнительные критерии идентификации SED были основаны на их отличии от земных молний и других мощных широкополосных сигналов, распространяющихся по одно- и многоскачковой трассам под низкими углами. Искомый сигнал на низких частотах частично отражается от земной ионосферы, а земные помехи на высоких частотах практически полностью высвечиваются сквозь прозрачную в этом диапазоне ионосферу. Это приводит к частичному разделению по спектру земных молний и SED. В то время как первые занимают нижнюю часть декаметрового диапазона (10 ÷ 20 МГц), вторые занимают весь частотный диапазон (10 ÷ 30 МГц) с небольшим ослаблением на низких частотах.

Детектирование SED осложнено широкополосными “тресками”, характерными для реле в системе управления лучом радиотелескопа. Критерием отсеивания таких помех является достаточно высокая амплитуда “тресков” и появление большого их числа в основном во время переключения кодов наведения радиотелескопа. На рис. 1 приведены примеры вышеуказанных помех в сравнении с сигналом SED.

Первоначально для поиска SED использовался критерий превышения уровня 10σ в едином широкополосном канале. Такой критерий был назван одноканальным. При этом были получены близкие к ожидаемым характеристическое время всплеск, распределение активности шторма за сеанс и другие параметры. Однако были отмечены некоторые особенности, вызвавшие сомнения в достоверности результатов: значительное число событий к концу сеансов А4 и А5, совпавшее с утренним повышением уровня радиопомех, и достаточно большое количество событий, зафиксированное во время сеанса А6 на УТР-2, в то время как на КА “Кассини” их было зарегистрировано только 3, вынудили ужесточить критерии поиска SED.

Чтобы исключить влияние мощных узкополосных помех, мы ограничивали данные в каждом узкополосном канале на уровне 3σ . Затем 5120 каналов были сгруппированы в 20 субполос (по 256 узкополосных каналов приемника). После суммирования в пределах 256 каналов (ширина субполосы около 1 МГц) мы анализировали появление сигнала на уровне выше 4σ суммарного сигнала. Использовался критерий наличия сигнала как минимум в двух, не обязательно смежных, субполосах. Такой алгоритм регистрации был назван многоканальным в отличие от первоначально применявшегося одноканального. Радиотелескоп имеет разную чувствительность в различных участках рабочего диапазона. Низкая чувствительность в верхней части диапазона может играть отрицательную роль в процессе регистрации. Это также является аргументом для использования многоканального метода детектирования. Предваритель-

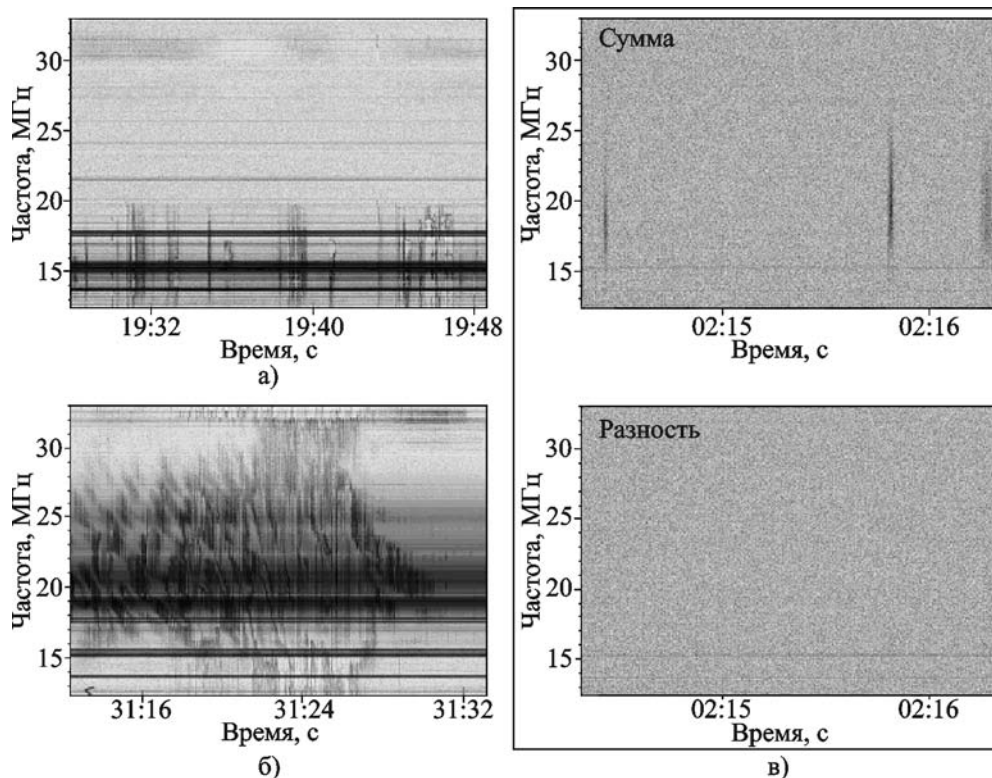


Рис. 1. Сравнение помех и SED: а) – внешние широкополосные помехи; б) – внутренние “трески”, характерные для реле или контактов радиотелескопа; в) – иллюстрация обнаружения SED с помощью суммарно-разностной методики (канал суммы – верхняя панель и канал разности – нижняя панель)

ная обработка мощных событий показала наличие SED с прерывистым спектром, что также говорит в пользу многоканального алгоритма обнаружения. Визуальный контроль был необходим для выявления случайного совпадения узкополосных помех, приводящих к ложному детектированию.

Данные о SED (время и уровень превышения 4σ в 20 субполосах), полученные с помощью такой методики в сеансах А1–А5, А8 сохранялись в соответствующую базу данных. Номер сеанса наблюдения, эпизод шторма, начало и конец сеанса наряду с обнаруженным количеством молний приведены в таблице.

Таблица. Время проведения сеанса и количество SED в наблюдениях шторма F

Сеанс	Дата старта/эпизод шторма F	Начало сеанса	Конец сеанса	Количество вспышек
A1	01.12.2007/F9	01:30:52	07:20:08	303
A2	01.12.2007/F11	23:43:40	04:39:39	269
A3	02.12.2007/F13	23:40:51	02:28:03	71
A4	04.12.2007/F15	04:16:47	07:18:00	226
A5	05.12.2007/F17	02:00:52	07:28:08	49
A8	12.12.2007/F33	04:27:24	07:13:42	35
				Всего 953

3. Результаты и обсуждение

Сравнение данных DSPZ и RPWS. Кросскорреляционные функции

Наиболее достоверной проверкой детектирования предполагаемых молний является совпадение времени SED, зарегистрированных УТР-2 и КА “Кассини”, с учетом всех временных задержек. Запаздывание между моментами регистрации сигнала КА “Кассини” и радиотелескопом УТР-2 составляло в среднем 76 мин 6 с.

Так как существует отличие темпа оцифровки: для RPWS он составляет ~ 35.2 мс (143 отсчета за 5.03 с), а для приемника DSPZ ~ 20 мс, то возникает неопределенность при локализации протяженных SED на временной шкале. Фиксировавшиеся на УТР-2 события могут попасть либо в один и тот же отсчет для КА “Кассини”, либо в разные. Поэтому кросскорреляционные функции (ККФ) рассчитывались для нескольких значений временного разрешения с последующим сравнением результатов. Для минимизации влияния мощных событий при анализе совпадений во времени ККФ рассчитывались без учета амплитуды сигнала.

Для построения ККФ были выбраны пять сеансов (A1-A5), в течение которых помеховая ситуация позволяла надежно идентифицировать молнии и наблюдалось соответствие в данных КА “Кассини” и УТР-2. На рис. 2 приведен

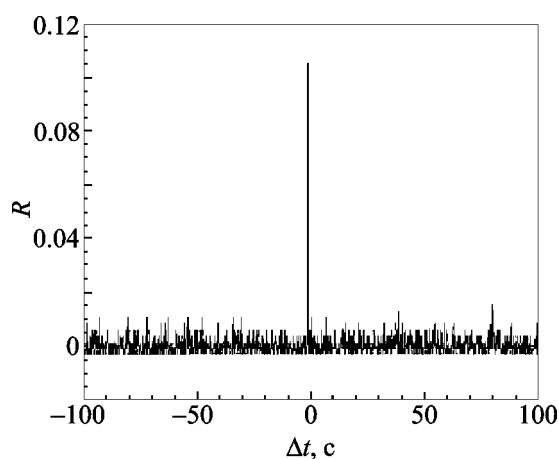


Рис. 2. Коэффициент корреляции данных УТР-2 и КА “Кассини” для сеанса A2

коэффициент корреляции R для сеанса A2, когда RPWS работал в обзорном режиме.

В функции имеется четкий максимум, характеризующий совпавшие события, и равномерное распределение несовпадающих событий во всем временном диапазоне анализа. Этот результат с определенностью показывает, что зафиксированные средствами наземной радиоастрономии электростатические разряды на Сатурне совпадают с зарегистрированными на КА “Кассини” событиями с высокой степенью достоверности. После учета временного смещения максимум располагается в нуле плюс-минус два дискрета по времени в отсчетах RPWS.

Функция временных разностей

ККФ показывают степень совпадения событий, зафиксированных двумя различными приемниками, в течение всего сеанса. Анализ попарного совпадения SED, зафиксированных двумя приемниками, проводится с помощью расчета функции временных разностей (ВР). Каждому зарегистрированному SED на УТР-2 было поставлено в соответствие ближайшее по времени событие, зарегистрированное КА “Кассини”. На рис. 3 приведена функция ВР для сеанса A2.

Определение числа совпавших событий может иметь несколько размытые границы из-за разной частоты оцифровки RPWS и DSPZ. Количество совпавших SED, отнесенное к ко-

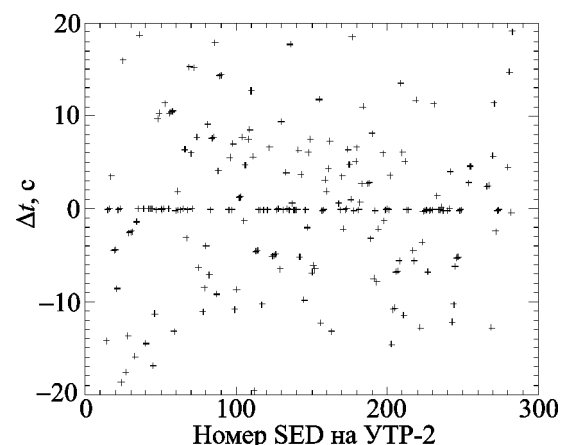


Рис. 3. Функция ВР для сеанса A2

личеству пар сравниваемых событий, при разных значениях временного разрешения для сеанса А2 составляет 96/393 (24.4 %) при 20 мс и 64/284 (22.5 %) при 110 мс. Следовательно, количество совпавших событий оказывается близким к 22 %, что равно коэффициенту использования времени наблюдения для КА “Кассини”. Это говорит о том, что, с одной стороны, аппаратура и алгоритмы детектирования SED средствами наземной радиоастрономии полностью себя оправдывают, а с другой стороны, в данном сеансе помеховая ситуация была весьма благоприятной и коэффициент использования времени наблюдений для УТР-2 был близок к 100 %. В другие дни количество совпавших молний составляло от 10 до 20 %, что говорит о заметно худшей помеховой обстановке. После столь надежного подтверждения возможностей детектирования SED средствами наземной радиоастрономии можно рассчитать количество SED за секунду на УТР-2 и КА “Кассини”. Триста девяносто трем событиям, зарегистрированным на УТР-2, должны соответствовать $912/0.22 = 4145$ SED, излученных из области шторма за время данной сессии. Соотношение чувствительности составляет примерно 1/10.

Анализ активности шторма в течение сеанса наблюдений

Функция ВР показывает индивидуально совпавшие события. Интегрально соответствие данных УТР-2 и КА “Кассини” отражает распределение количества событий по времени за получасовые интервалы. На рис. 4 приведено количество событий за получасовые интервалы в течение сеансов А2 на УТР-2 и F11 на КА “Кассини”. Видно хорошее соответствие данных за все время наблюдений на УТР-2 (около 4 часов).

Характеристики SED

С помощью разработанного многоканального алгоритма обнаружения были зарегистрированы и каталогизированы около 1000 событий. По всей совокупности сеансов (рис. 5) и отдельно по сеансам было определено характеристическое время τ (параметр экспоненциальной аппроксимации $\exp(-t/\tau)$ распределения количества молний по длительности).

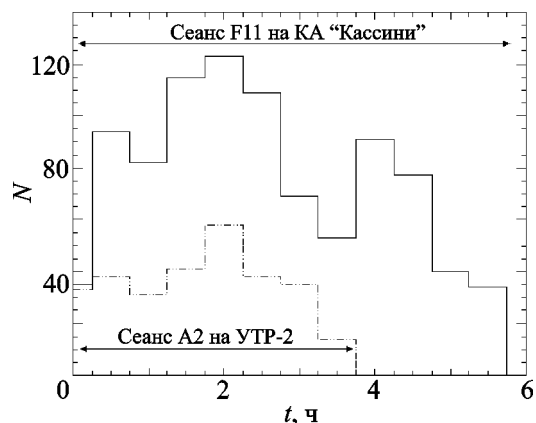


Рис. 4. Сравнение активности шторма за получасовые интервалы во время сеансов А2 на УТР-2 и F11 на КА “Кассини”

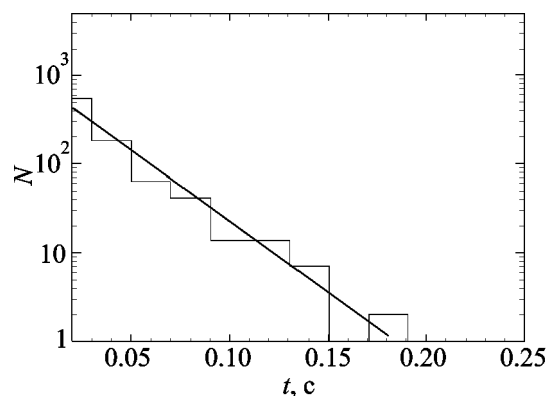


Рис. 5. Гистограмма распределения SED по их длительности для всех сеансов, $\tau = 27.2$ мс

Ранее было известно о связи активности шторма и τ . Для сеансов А1–А5, А8 на рис. 6 приведены значения τ в зависимости от количества событий в секунду.

Тангенс угла наклона линии тренда, проведенной по методу наименьших квадратов (рис. 6), равен 0.57. Ранее в работе [2] был проведен анализ корреляции активности шторма и характеристического времени вспышек. Коэффициент корреляции составлял 0.56. В наших данных получено значение 0.77 ± 0.15 , при этом надо отметить, что набор данных невелик. Более высокий коэффициент корреляции может быть объяснен влиянием высокого шумового порога. Как показано на рис. 6 (правый нижний

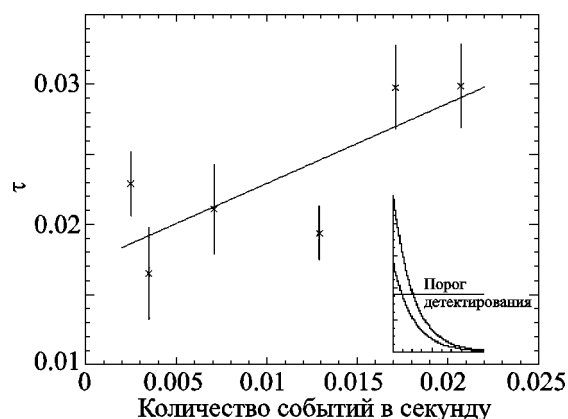


Рис. 6. Зависимость параметра τ от активности шторма

угол), если шторм сопровождается событиями с более высокими значениями интенсивностей (верхняя кривая), то большее количество сигналов превышает порог детектирования и более длительное время находится над ним.

4. Выводы

В результате обработки была получена высокая степень совпадения наземных и космических данных. При благоприятной помеховой ситуации разработанная методика обеспечивает высокую степень достоверности детектирования SED. Для данной серии наблюдений определено характеристическое время SED и зависимость количества SED от активности эпизода шторма в начальный период шторма F.

Высокая степень совпадения как индивидуальных событий, так и количества SED в единицу времени дает базу для изучения спектральных и временных характеристик с высокими параметрами временного и частотного разрешения средствами наземной радиоастрономии для исследования SED и для наблюдений электростатических разрядов на других планетах.

Литература

1. Konvalenko A. A., Lecacheux A., Rucker H. O., Fischer G., Abranin E. P., Kalinichenko N. N., Falkovich I. S., Sidorchuk K. M. Ground-based Decameter Wavelength Observations of Saturn Electrostatic Discharges // *Geophysical Research Abstracts*, 9, 04792.

2. Fischer G., Kurth W. S., Dyudina U. A., Kaiser M. L., Zarka P., Lecacheux A., Ingersoll A. P., Gurnett D. A. Analysis of a giant lightning storm on Saturn // *Icarus*. – 2007. – Vol. 190, Issue 2. – P. 528-544.

3. Gurnett D. A., Kurth W. S., Kirchner D. L., Hospodarsky G. B., Averkamp T. F., Zarka P., Lecacheux A., Manning R., Roux A., Canu P., Cornilleau-Wehrlin N., Galopeau P., Meyer A., Boström R., Gustafsson G., Wahlund J.-E., Åhlen L., Rucker H. O., Ladreiter H. P., Macher W., Woolliscroft L. J. C., Alleyne H., Kaiser M. L., Desch M. D., Farrell W. M., Harvey C. C., Louarn P., Kellogg P. J., Goetz K., and Pedersen A. The Cassini Radio and Plasma Wave Science Investigation // *Space Sci. Rev.* – 2004. – Vol. 114. – P. 395-463.

4. Kozhin R. V., Vynogradov V. V., Vavriv D. M. Low-noise, high dynamic range digital receiver/spectrometer for radio astronomy applications // *Proc. MSMW'07 Symposium*. – 2007. – Kharkiv (Ukraine). – P. 736-738.

Идентифікація блискавок на Сатурні, зареєстрованих радіотелескопом УТР-2 і космічним апаратом “Кассіні”

В. В. Захаренко, К. Ю. Милостна, Г. Фішер, О. О. Коноваленко, Ф. Зарка, Ж.-М. Гріссмайєр, Б. П. Рябов, Д. М. Ваврів, В. Б. Рябов, Г. Рукер, П. Рав'є, М. А. Сидорчук, Б. Цеконі, А. Кофрі, Л. Дені, К. Фабріс, Р. В. Кожин, Д. В. Муха, Л. Пал'є, І. Шнайдер, В. О. Шевченко, В. В. Виноградов, Р. Вебер, В. С. Ніколаєнко

Досліджуються електростатичні розряди на Сатурні (Saturn Electrostatic Discharges – SED) за даними одночасних спостережень початкового періода шторму F на радіотелескопі УТР-2 та космічному апараті “Кассіні”. Записи на УТР-2 виконувалися за допомогою спектрального приймача у смузі 12 ÷ 33 МГц, а на апараті “Кассіні” – послідовним спектроаналізатором RPWS (Radio Plasma Wave Science) у смузі 1.8 ÷ 16 МГц. За результатами обробки отримано високий ступінь збігу наземних вимірювань і даних, отриманих на апараті “Кассіні”. Визначено характеристичний час SED та його залежність від інтенсивності епізоду в початковий період шторму F.

**Identification of Saturn Lightnings
Recorded by the UTR-2 Radio Telescope
and Cassini Spacecraft**

**V. V. Zakharenko, K. Y. Mylostna,
G. Fischer, A. A. Konovalenko, P. Zarka,
J.-M. Grießmeier, B. P. Ryabov,
D. M. Vavriv, V. B. Ryabov, H. Rucker,
P. Ravier, M. A. Sidorchuk, B. Cecconi,
A. Coffre, L. Denis, C. Fabrice,
R. V. Kozhyn, D. V. Mukha, L. Pallier,
J. Schneider, V. A. Shevchenko,
V. V. Vinogradov, R. Weber,
and V. S. Nikolaenko**

The Saturn electrostatic discharges (SED) simultaneously recorded in the initial period of storm F at the UTR-2 radio telescope and Cassini spacecraft are investigated. The UTR-2 used the FFT-spectral receiver operating $12 \div 33$ MHz, while the Cassini the serial spectrum analyser RPWS (Radio Plasma Wave Science) operating $1.8 \div 16$ MHz. The ground and space data processed have shown very good agreement. E-folding time of SED and its dependence on episode intensity in the initial period of storm F were determined.