

УДК 523.16

К. Ю. МИЛОСТНАЯ, В. В. ЗАХАРЕНКО

Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: krystyna.mylostna@gmail.com

## ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА САТУРНЕ И ДРУГИХ ПЛАНЕТАХ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

*Проанализированы результаты исследований грозовой активности планет с целью оценить возможность ее регистрации и изучения крупнейшими наземными низкочастотными радиотелескопами, такими как УТР-2, радиоинтерферометрами системы УРАН, а также LOFAR (Low Frequency Array), LWA (Long Wavelength Array) и ГУРТ (Гигантский украинский радиотелескоп)*

*Ключевые слова:* грозовая активность, планеты, электростатические разряды, декаметровый диапазон длин волн

### 1. Введение

Существование молний на планетах Солнечной системы, в частности на Юпитере и Сатурне, было предсказано за десятилетие до их открытия космическими аппаратами (КА) Вояджер [1] на основе исследований химического состава и результатов теоретического моделирования структуры и динамики атмосфер этих планет. Электрические атмосферные процессы изменяют физические свойства атмосферы и влияют на ее химический состав, поскольку разрывают молекулярные связи и, как следствие, запускают цепочки различных химических реакций внутри разрядного канала, приводящих к появлению новых химических соединений [2].

Хотя процессы накопления заряда в атмосферах различных планет имеют специфические особенности, все они влекут за собой появление крупномасштабного электрического поля, достаточно сильного для осуществления электрического пробоя [3]. Наряду с хорошо изученными процессами возникновения и разделения зарядов в глубине водяных облаков на Земле, а также активно изучаемыми разрядами на Юпитере и Сатурне известны эффекты, способные обеспечить электризацию в условиях пылевых бурь и вулканической деятельности на Марсе и спутниках планет, в метановых облаках на Титане и при комбинации различных процессов в многослойных облаках на Венере. Именно молнии внутри облаков и облачных слоев являются наиболее распространенным типом планетарных молний и поэтому требуют более детального изучения [4].

Спектр электромагнитного излучения, порождаемого электростатическими разрядами (ED – electrostatic discharges) на планетах Солнечной системы, простирается от самых низких частот до рентгеновского и гамма-диапазона [5, 6]. На протяжении 25 лет (с 1981 г.) исследования ED на Сатурне осуществлялись с помощью космических средств в диапазоне от десятков килогерц до 40 МГц. С появлением модернизированной аппаратуры стало возможным детектирование внеземных ED наземными средствами в диапазоне частот  $8 \div 33$  МГц. Так, ED на Сатурне впервые были зарегистрированы в декаметровом диапазоне длин волн с помощью радиотелескопа УТР-2 [7], что привело к открытию новой области исследований в планетарной радиоастрономии.

Новая аппаратура, внедренная на УТР-2 [8, 9] в рамках программы модернизации радиотелескопа, позволила существенно расширить возможности изучения грозовых явлений в атмосферах планет Солнечной системы за счет усовершенствованных алгоритмов устранения помех [7] и методики наблюдений.

Обобщение накопленной информации во всех диапазонах частот позволяет выработать наиболее эффективную стратегию поиска электростатических разрядов в атмосферах планет. Учитывая спорадический характер проявлений грозовой активности, а также опыт проведения совместных наблюдений на телескопе УТР-2 и КА “Кассини” [10, 11], наиболее информативными можно считать совместные наблюдения в разных частотных диапазонах (радио-, оптическом, инфракрасном и т. д.) с помощью КА и наземных телескопов. Разработка программ совместных наблю-

дений позволит сделать новый шаг в исследовании особенностей радиоизлучения молний.

В настоящей статье рассматриваются результаты исследования грозовой активности на планетах Солнечной системы в последние десятилетия. Электростатические разряды на Сатурне описаны в разделе 2. В разделе 3 проводится обзор исследований грозовой активности в атмосферах других планет и спутников Солнечной системы. В разделе 4 обсуждаются действующие и перспективные программы поиска и исследования молний в декаметровом и метровом диапазонах на гигантских низкочастотных радиотелескопах.

## 2. Молнии в атмосфере Сатурна

Впервые SED (Saturn electrostatic discharges) были зарегистрированы КА “Вояджер-1” в 1980 г. как всплески интенсивности неопределенной природы в низкочастотном диапазоне. Они были описаны как импульсные радиосигналы в полосе частот от 20.4 кГц (нижняя граница диапазона позже была уточнена) до 40.2 МГц с интегральной мощностью  $10^7 \div 10^8$  Вт без явно выраженной поляризации и длительностью порядка нескольких десятков миллисекунд [12]. В 1982 г. исследования, проведенные КА “Вояджер-2” [13], подтвердили существование SED. Кроме того, было обнаружено, что излучение некоторых разрядов поляризовано. По данным наблюдений обоих КА был сделан вывод, что SED наблюдаются группами (сеансами), которые повторяются с периодичностью, близкой к периоду вращения Сатурна, причем сеансы, как правило, следуют друг за другом в течение нескольких дней или даже месяцев.

**2.1. Локализация SED и природа их источника.** Первоначально SED не были идентифицированы как сигналы, источник которых находится в атмосфере. Для поиска источников излучения с определенным периодом повторения (10 ч 10 мин) были проведены дополнительные исследования подходящих регионов. Таких регионов два: регион в кольце В на расстоянии 1.8 радиуса Сатурна от его поверхности, имеющий период вращения 10 ч 09 мин [13], и экваториальная область в атмосфере самой планеты [14, 15], где скорость обращения верхнего слоя облаков составляет 10 ч 10 мин. Расчет промежутка времени, в течение которого Сатурн не затеняет источник излучения для КА “Вояджер”, позволяет

определить ожидаемую длительность эпизода. Расчетные значения для атмосферного источника лучше совпадают с реальными данными [16]. По данным КА “Кассини”, эти события были привязаны к наблюдаемой зоне облачной активности – шторму. Штормом принято называть достаточно длительный период SED-активности (от нескольких дней до нескольких месяцев), сопровождающийся наличием динамичных облачных образований в атмосфере Сатурна.

Впервые взаимосвязь между SED и оптически проявляемыми гроз была обнаружена в 2004 г. с помощью КА “Кассини” [17–19]. В дальнейшем в работе [20] было показано, что при достаточной высокой интенсивности шторма наблюдается хорошая корреляция интенсивности радиоизлучения и облачной активности на протяжении большей части сеанса, за исключением его начальной фазы. В начале сеанса существует особенность: события начинают регистрироваться в радиодиапазоне еще до момента появления штормовых облаков на лимбе планеты. Еще одной особенностью SED является регистрация излучения ниже локальной плазменной частоты ( $\sim 1$  МГц).

Для объяснения этих эффектов в работе [21] было проведено моделирование процессов распространения радиосигнала SED в ионосфере на ночной стороне планеты. В целом ионосфера для радиосигнала ниже плазменной частоты непрозрачна, и сигнал отражается от нее. Но, поскольку ионосфера Сатурна очень динамична (электронная плотность может изменяться на два порядка в течение нескольких часов), в ней могут образовываться “окна прозрачности”. Поэтому в результате отражений и высвечивания сигналов через “окна прозрачности” ионосферы Сатурна SED могут быть зарегистрированы до появления шторма на лимбе, в том числе и на частотах ниже локальной плазменной частоты (с учетом геометрии распространения).

В 2009 г., во время весеннего равноденствия на Сатурне, атмосферная природа источника SED-излучения была подтверждена оптическими наблюдениями молний, ассоциировавшимися с SED, [22]. Вспышки были зарегистрированы камерой, установленной на КА “Кассини” – ISS (Imaging Science Subsystem), когда кольца Сатурна находились практически в плоскости эклиптики и их яркость была минимальна. Наблюдалось не только совпадение во времени регистраций оптических

и радиосигналов, но и корреляция их мощностей в обоих диапазонах частот [23].

Таким образом, поиск молний в оптическом диапазоне, который проводился с 2004 г., увенчался успехом. Была определена локализация вспышек, 125 ÷ 250 км ниже верхнего слоя облаков. Это соответствует высоте H<sub>2</sub>O облаков (смешанной фазы) или промежуточному слою облаков NH<sub>4</sub>SH [22]. С другой стороны, в условиях недостатка энергии, получаемой от Солнца, предполагается, что грозы на Сатурне обусловлены внутренними тепловыми процессами, обеспечивающими конвективное движение в облаках H<sub>2</sub>O и NH<sub>3</sub> на уровнях высот, где давление составляет 10 ÷ 12 бар и 1 ÷ 2 бар соответственно [3, 4, 24]. Авторы перечисленных работ считают, что накопление заряда происходит на атмосферных высотах, где давление составляет приблизительно от 8 до 10 бар (примерно на 200 ÷ 300 км ниже уровня, где давление составляет 1 бар). Эти данные хорошо согласуются с результатами упомянутых выше наблюдений [22].

**2.2. Классификация штормов.** Со времени обнаружения грозовой активности на Сатурне были опубликованы сведения о 13 штормах (до 2011 г.). Штормы V1 и V2 наблюдались КА “Вояджер-1” и “Вояджер-2”. Диапазон приемника PRA (Planetary Radio Astronomy), регистрировавшего SED, составлял 20 кГц ÷ 40.2 МГц. Первый шторм, который

зарегистрировал КА “Кассини” в мае 2004 г. назвали нулевым, а последующие – заглавными буквами в алфавитном порядке. Записи SED проводятся КА “Кассини” с помощью бортового двухдиапазонного последовательного спектроанализатора RPWS (Radio Plasma Wave Science) [17].

Эпизод шторма обычно длится 6 ÷ 6.5 ч, что составляет чуть больше половины периода вращения планеты. Количество событий в эпизоде варьируется от нескольких единиц до нескольких тысяч. Штормы отличаются друг от друга длительностью, интенсивностью и размерами штормовой системы облаков. В табл. 1 приведены основные данные о каждом шторме: дата, обозначение шторма, телескоп или КА, с помощью которых велись наблюдения, длительность и локализация. Данные были взяты из работ [12, 13, 23–25].

На Сатурне наиболее ярко выражены сезонные изменения (перепад температур, освещенность солнечными лучами различных широтных участков планеты в течение года), что обусловлено большим наклоном оси вращения ( $\approx 26.73^\circ$ ) и наличием мощной кольцевой системы. Весеннее равноденствие августа 2009 г. на Сатурне стало началом очередной весны в северном полушарии. Тень от колец пересекла экватор планеты, и последующую половину сатурнианского года

Таблица 1. Даты, длительности и локализация штормов, зафиксированных КА “Вояджер-1”, “Вояджер-2” и “Кассини”

Год	Обозначение шторма	Наблюдатель	Месяц	Длительность, сутки	Полушарие	Местное время года
1980	V1	“Вояджер-1”	Ноябрь	> 8	Северное*	Весна
1981	V2	“Вояджер-2”	Август	> 5	Северное*	Весна
2004	0	“Кассини”	Май	$\approx 6$	–	Лето
2004	A	“Кассини”	Июль	$\approx 8$	Южное	Лето
2004	B	“Кассини”	Август	$\approx 8$	Южное	Лето
2004	C	“Кассини”	Сентябрь	$\approx 25$	Южное	Лето
2005	D	“Кассини”	Июнь	$\approx 8$	–	Лето
2006	E	“Кассини”, УТР-2	Январь–февраль	$\approx 31$	Южное	Лето
2007–2008	F	“Кассини”, УТР-2	Ноябрь–июль	$\approx 231$	Южное	Лето
2008	G	“Кассини”, УТР-2	Ноябрь–декабрь	$\approx 22$	Южное	Лето
2009	H	“Кассини”, УТР-2	Январь–декабрь	$\approx 333$	Южное	Лето
2010	I	“Кассини”, УТР-2	Февраль–июль	$\approx 157$	Южное	Лето
2010–2011	J	“Кассини”, УТР-2	Декабрь–июнь	$\approx 210$	Северное	Весна

\* Предположение о регистрации штормов V1 и V2 в северном полушарии, а не на экваторе сделано авторами в работе [23].

она будет затемнять южное полушарие, что предполагает более изменчивые атмосферные структуры, а также более изменчивую динамику верхней тропосферы и стратосферы Сатурна в северном полушарии [26].

Размеры штормов колеблются в пределах от нескольких до более чем 10 тыс. километров (шторм J). Большинство штормов (в отличие от грозовой активности на Земле и Юпитере) были локализованы в относительно узкой полосе широт ( $\approx 5^\circ$ ). Почти все они были зафиксированы около 35-й планетоцентрической параллели южного (штормы A–C, E–I) и северного (шторм J) полушарий. Важно отметить, что при смене полушария (вначале КА “Кассини” наблюдал грозы в южном полушарии, см. табл. 1), значение широты, где происходил шторм, осталось приблизительно таким же ( $\approx 35^\circ$ ). В южном полушарии эта параллель получила название “аллея штормов” [20, 25, 27, 28]. До середины июля 2010 г. космическим аппаратом “Кассини” штормовые облака наблюдались в диапазоне значений южной планетоцентрической широты  $33^\circ \div 38.5^\circ$ . Этот регион связан также с активными, но недолго живущими конвективными образованиями [29].

Шторм J (см. табл. 1), который развился из небольшого пятна в обвивающий планету турбулентный поток колоссальных размеров, начался примерно через год и четыре месяца после весеннего равноденствия на Сатурне. Первые облака были зарегистрированы в северном полушарии на широте  $34^\circ$  и впоследствии шторм занимал положение между 33-й и 38-й северными планетоцентрическими широтами [25]. В связи с тем что значения широт шторма оказались приблизительно таким же, как и у “аллеи штормов”, в работе [23] было высказано предположение о том, что SED-эпизоды, которые наблюдались КА “Вояджер-1” и “Вояджер-2”, также могли относиться к шторму в северном полушарии, а не к шторму в экваториальной зоне, как считалось ранее. Впервые штормы начали наблюдать на планете приблизительно на 30 лет раньше весеннего равноденствия 2009 г., т. е. во время предыдущей весны (сатурнианский год равен 29.5 земным годам). Кроме того, тогда же в окрестности  $35^\circ$  северной широты космические аппараты “Вояджер-1” и “Вояджер-2” регистрировали конвективные облачные образования в атмосфере Сатурна [23].

Для большинства штормов в южном полушарии Сатурна характерен дрейф в западном направлении на  $0.2^\circ \div 0.3^\circ$  в течение периода, равного земным суткам [20]. Скорость дрейфа гигантского шторма J была в 8–10 раз больше ( $2.3^\circ \div 2.8^\circ$  в сутки) [23]. Таким образом, параметры шторма очень изменчивы во времени, и поэтому предсказание возникновения и развития шторма – очень сложная задача.

**2.3. Параметры SED.** SED ассоциируются с проявлениями электростатических разрядов в радиодиапазоне, поскольку именно в этом диапазоне они были обнаружены. Но очевидно, что молнии, могут быть зарегистрированы в очень широком диапазоне частот. По причине отсутствия твердой поверхности и наличия мощных облачных слоев считается, что молнии на Сатурне являются аналогом земных между- и внутри-облачных молний [4].

**Длительность SED.** Длительности молний составляют от 10 до 500 мс [30]. Распределение длительности событий хорошо описывается зависимостью  $e^{-t/\tau}$ , где  $\tau$  – характеристическое время (при котором число событий падает в  $e$  раз) [24]. Параметр  $\tau$  определяется для каждого шторма. При пролете аппаратов “Вояджер-1” и “Вояджер-2” он составил 41 мс и 38 мс для первой и второй миссии соответственно [31]. Верхняя граница характеристического времени для различных штормов, определенная по данным КА “Кассини”, примерно равна 50 мс (например, для штормов D и E значение  $\tau$  было равно  $48 \pm 12$  мс и  $49 \pm 3$  мс соответственно [30]). Нижняя граница характеристического времени определена значительно менее точно, поскольку реальное временное разрешение RPWS составляет 35.2 мс. По данным с временным разрешением 20 мс, полученным на радиотелескопе УТР-2 в 2007 г. (шторм F)  $\tau \approx 27 \pm 2$  мс [11].

В работе [31] была установлена корреляция (с коэффициентом корреляции 0.51) между количеством молний и характеристическим временем. В этой же работе была найдена похожая зависимость интенсивности вспышки от ее продолжительности. То есть эпизоды с большим количеством событий и более сильными всплесками содержат более длительные вспышки.

**Поляризация.** До наблюдений КА “Кассини” поляризация SED оставалась неопределенной. Хотя КА “Вояджер-1” зарегистрировал поляризацию

некоторого числа SED [32], позже было показано, что этот результат на верхних частотах приемника ( $15 \div 40$  МГц) мог быть частично или полностью обусловлен инструментальным эффектом [13, 33]. Поляризационные наблюдения, проведенные КА “Кассини” показали, что излучение SED сильно поляризовано (в среднем степень поляризации составляет 80 %) и в большинстве случаев имеет правую круговую поляризацию [34]. Было установлено, что с увеличением частоты процентный состав событий с круговой поляризацией уменьшается от 90 % на частоте 900 кГц до 60 % на частоте 1800 кГц. На сегодняшний день изучение поляризационных свойств исследуемых эффектов на частотах выше 2 МГц возможно с помощью наземных инструментов, например, с помощью радиотелескопа УРАН-2.

Следует отметить, что все импульсы земных молний имеют линейную поляризацию, тогда как внеатмосферные приемники регистрируют круговую поляризацию этого излучения вследствие влияния магнитного поля Земли [35]. Так, по данным искусственного спутника Земли “FORTE” [36], события TIPP (Transionospheric pulse pairs) наблюдаются как сильно поляризованные выбросы. Это согласуется с идеями работы [34], в которой отмечается что 60 % SED имеют круговую поляризацию на частоте ниже 2 МГц. При наблюдении шторма J в северном полушарии зафиксирована левая круговая поляризация, тогда как предыдущие штормы (в южном полушарии) имели правую круговую поляризацию [34, 23].

*Спектр SED.* Как уже упоминалось, SED являются широкополосными событиями. На данный момент SED наблюдались в метровом и декаметровом диапазонах вплоть до частоты 40 МГц. Нижняя граничная частота регистрации SED, которая связана с пиковыми значениями электронной концентрации ионосферы Сатурна, по данным КА “Кассини” [28], составляет от  $0.7 \div 1$  МГц в ночное время и до 6 МГц в дневное (определяется плазменной частотой ионосферы Сатурна) [29].

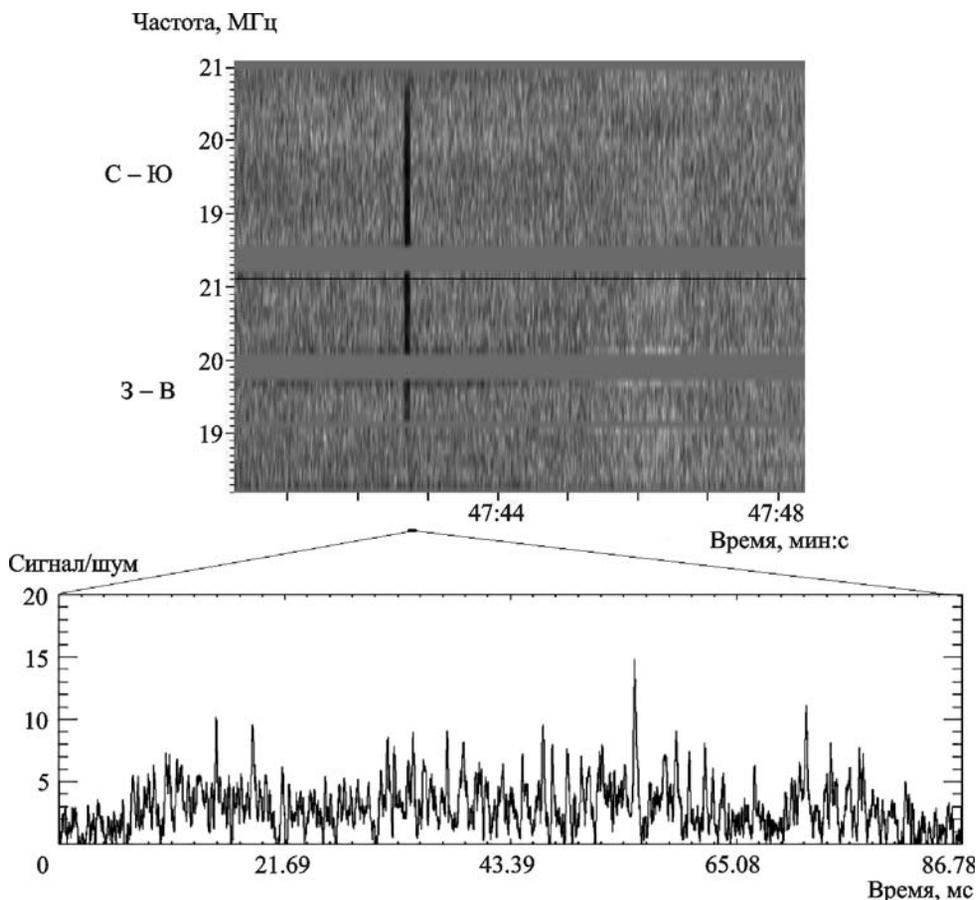
Значение пиковой электронной концентрации ионосферы Сатурна существенно изменяется в течение суток (время оборота Сатурна вокруг своей оси составляет примерно 10.6 ч). В среднем, по данным, полученным КА “Кассини” [29], электронная концентрация ионосферы составляет  $\approx 5 \cdot 10^4$  см<sup>-3</sup> (изменяется от  $10^4$  см<sup>-3</sup> до

$10^5$  см<sup>-3</sup>). Этот результат согласуется с измерениями с борта КА “Вояджер” – в экваториальной области был обнаружен ход электронной концентрации от  $\approx 10^3$  см<sup>-3</sup> (ночью) до  $\approx 10^5$  см<sup>-3</sup> (днем) [37, 38]. Суточный ход, а также пиковые (максимальные) значения плотности электронов в ионосфере южного полушария Сатурна имеют тенденцию к уменьшению с мая 2004 г. до конца 2009 г., что согласуется с уменьшением потока солнечной энергии в связи с изменением времен года [29].

Средний спектр SED, по данным КА “Кассини” [39], является “плоским” (интенсивность SED пропорциональна  $f^{-0.5}$ ) в диапазоне частот  $4 \div 16$  МГц. Это согласуется с данными, полученными КА “Вояджер-1” и “Вояджер-2” в соответствии с которыми спектр является “плоским” в диапазоне от единиц мегагерц до 20 МГц, а выше, до 40 МГц, наблюдается спад интенсивности излучения пропорционально  $f^{-\alpha}$ ,  $\alpha = 1 \div 2$  [26].

*Временная структура разрядов SED и энергия молний.* “Плоский” спектр в диапазоне  $4 \div 16$  МГц дал основание предположить, что каждый разряд SED состоит из серии очень коротких импульсов с длительностью меньше 1 мкс [40, 41], что должно приводить к существенному понижению суммарной энергии молнии от значений  $10^{12} \div 10^{13}$  Дж [18] до  $10^7$  Дж. Для подтверждения или опровержения этого предположения требовалось провести измерения с высоким (микросекундным) временным разрешением. В настоящее время такие измерения можно осуществить только с помощью широкополосных наземных приемников, установленных на крупнейших радиотелескопах декаметрового диапазона длин волн.

Излучение молний во время шторма F (см. табл. 1) было зарегистрировано на телескопе УТР-2 с временным разрешением 170 нс в полосе частот  $18 \div 21$  МГц. На рис. 1 представлен фрагмент сеанса записи SED 4 декабря 2007 г. Вверху приведена спектрограмма с временным разрешением 6 мс, записанная в полосе  $18 \div 21$  МГц. Молния длительностью  $\approx 80$  мс (верхняя панель) хорошо видна на фоне шумов. На нижней панели приведен временной профиль молнии с разрешением 45 мкс. Это компромиссное значение временного разрешения (при максимально возможном для записи в режиме “waveform” – 15 нс) было выбрано для сохранения соотношения сигнал/шум на уровне  $10 \div 15$ . Зависимость, приведенная на



**Рис. 1.** Тонкая структура SED (шторм F, сеанс 4.12.2007 г.): спектрограмма молнии с разрешением 6 мс (верхняя панель); профиль молнии с временным разрешением 45 мкс (нижняя панель). Верхняя часть спектрограммы получена с помощью антенны Север-Юг (С-Ю), а нижняя – с помощью антенны Запад-Восток (З-В). На нижней панели сигнал, превышающий уровень  $3\sigma$ , состоит из большого числа отдельных узких пиков, соотношение сигнал/шум для некоторых достигает 15

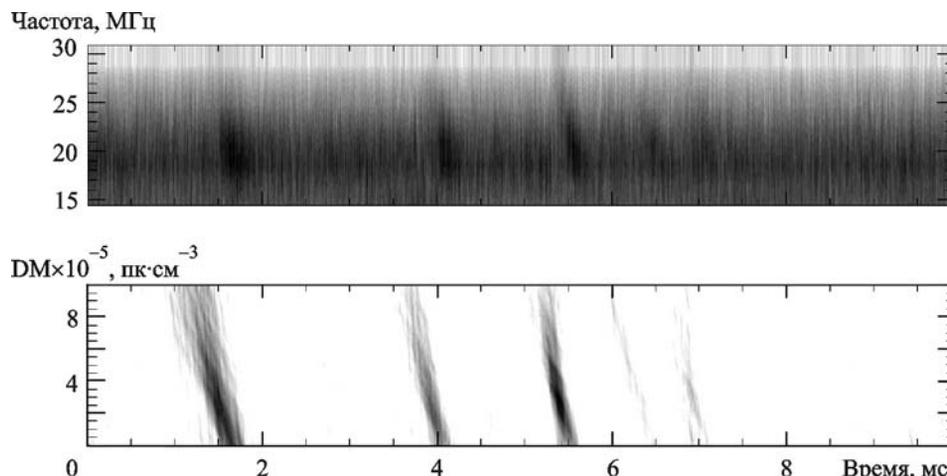
нижней панели, нормирована на значение средне-квадратического отклонения шума  $\sigma$  вне молнии. В накопленном по частоте сигнале существуют как всплшки (ширина на уровне половины максимума амплитуды) длительностью порядка сотни микросекунд так и плато выше уровня  $3\sigma$ .

Пики сигнала, которые достигают уровня  $15\sigma$  имеют длительность до нескольких сотен микросекунд (рис. 1). Таким образом, предположение о том, что разряд состоит из серии очень коротких импульсов с длительностью меньше 1 мкс, не совсем верно. Разряд действительно состоит из серии импульсов, но их длительность на порядок больше.

Подобный результат был получен также во время чрезвычайно сильного шторма J. На верхней панели рис. 2 изображена серия отдельных всплесков с разрешением 500 нс. Поскольку интенсивность всплесков шторма J была в среднем

на 10 дБ выше, чем у разрядов шторма F (рис. 1), и полоса записи расширена до  $12 \div 33$  МГц, стало возможным записывать индивидуальные всплески с высокими соотношением сигнал/шум и временным разрешением. Структура всплеска содержит пики с длительностью от нескольких десятков микросекунд до  $100 \div 200$  мкс. Это является аргументом в пользу того, что оценка суммарной энергии молнии составляет  $10^{12}$  Дж [18], а не  $10^7$  Дж, как было предположено в работе [40].

*Дисперсионная задержка.* Данные с высоким временным разрешением содержат важную информацию о внутренней структуре молний и об энергетических характеристиках составляющих этой структуры (поток в максимумах излучения молнии составляет  $1000 \div 1400$  Ян). Но, кроме этого, они позволили обнаружить дисперсионную задержку в диапазоне частот  $15 \div 32$  МГц. Сигнал SED проходит через три различные ионизированные



**Рис. 2.** Дисперсионная задержка сигналов SED (шторм J, сеанс 23.12.2010 г., начало приведенной записи – 3:56:38.1356 UT). На верхней панели показана спектрограмма части молнии (отчетливо видны 3 интенсивных коротких разряда и еще 2 слабых) в частотном диапазоне 15 ÷ 31 МГц с временным разрешением 500 нс. На нижней панели – зависимость DM от времени (для каждого сигнала существует максимум интенсивности, который определяет DM отдельного разряда, для данного участка записи DM составляет  $(2.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$  пк · см<sup>-3</sup>

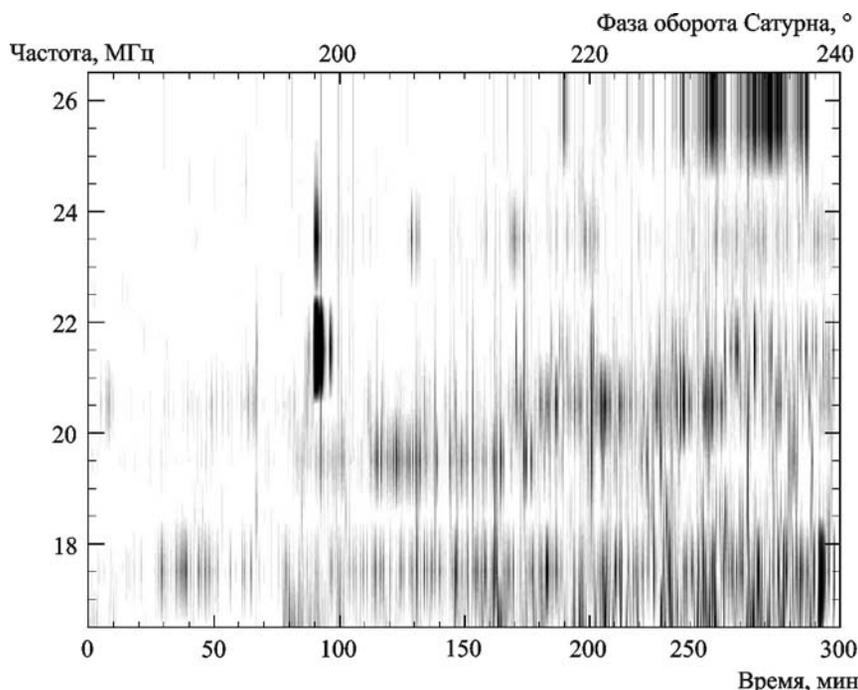
среды: ионосферу Сатурна, межпланетную среду и ионосферу Земли. Оценка ожидаемой меры дисперсии (DM) в ионосфере Земли составляет  $(1 \div 5) \cdot 10^{-6}$  пк · см<sup>-3</sup> по данным работы [42], в ионосфере Сатурна  $DM = (0.4 \div 4) \cdot 10^{-6}$  пк · см<sup>-3</sup> [29] и для межпланетной среды на порядок выше, т. е.  $(5 \div 100) \cdot 10^{-6}$  пк · см<sup>-3</sup> [43]. Для граничных частот диапазона 15 ÷ 31 МГц в приведенных данных (см. рис. 2) временная задержка составляет примерно 300 мкс. На нижней панели рис. 2 представлена интенсивность излучения микросекундных деталей SED в координатах “время – DM”. Максимум сигнала соответствует значениям DM  $(2.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$  пк · см<sup>-3</sup> [41].

*Долговременные вариации.* Записи эпизодов (длительностью до 7 часов) позволяют зарегистрировать долговременные вариации интенсивности и числа событий в единицу времени. Так, на рис. 3 представлена часть записи, полученная 23 декабря 2010 г. на радиотелескопе УТР-2 в полосе частот 16 ÷ 30 МГц. Ни один из упомянутых в статье КА не имел возможности длительной регистрации сигналов в этом диапазоне (короткие сеансы записи с высоким временным разрешением и полосой частот с верхней границей до 40 МГц мог производить КА “Вояджер-2”). Верхняя граница излучения зависит от фазы шторма и растет при приближении источника к локальному полдню. Такая закономерность обнаружена впервые.

### 3. Грозовая активность на других планетах Солнечной системы

Выше уже упоминалось, что молнии зарегистрированы на нескольких планетах Солнечной системы. Они существуют не только на Земле и Сатурне, но обнаружены также на Юпитере и Уране. Косвенные признаки и следствия возможной грозовой активности, которая не сопровождается интенсивными электростатическими разрядами, наблюдаются на Венере, Нептуне и Марсе.

**3.1. Уран.** Впервые широкополосные (от 900 кГц до ~ 40 МГц) вспышки на Уране были зарегистрированы КА “Вояджер-2” в 1986 г. [4, 44]. Обнаруженные сигналы имеют схожие с SED характеристики и потому получили аналогичное название UED (Uranian Electrostatic Discharges) [44]. Частота регистрации вспышек UED много меньше частоты регистрации SED. За 24 ч наблюдений КА “Вояджер-2” обнаруживал десятки тысяч SED, за такой же период времени UED было обнаружено всего около 140. Это соответствует частоте регистрации примерно 7 событий в час при приближении КА к Урану на расстояние 20 радиусов планеты [45]. Мощность излучения UED на частотах ниже 20 МГц пропорциональна  $f^{-1}$ , а выше –  $f^{-2}$ . Средняя длительность вспышки составляет 120 мс при регистрации событий длительностью 100 ÷ 300 мс [44]. Это в несколько раз больше средней длительности SED.



**Рис. 3.** Спектрограмма сеанса наблюдений (длительность 300 мин, начало записи в 2:30 UT) 23 декабря 2010 г. На верхней оси приведена фаза оборота Сатурна в координатах сатурнианской системы долгот, используемой для КА “Вояджер” (Voyager Saturn Longitude System, SLS). Источник располагался в окрестности 275° западной долготы

В оптическом диапазоне вспышки в атмосфере Урана не были зарегистрированы. Вероятной причиной может являться непрозрачность нижней стратосферы планеты на высоте более нескольких сотен километров над уровнем, где давление составляет 1 бар [46]. По оценкам авторов статьи [47], свет от молнии, возникшей на 200 ÷ 400 км ниже уровня, где давление равно 1 бар (предполагается источник на высоте, где давление составляет 40 бар [48]), будет полностью поглощен.

Значения плотности потока излучения UED, приведенной к расстоянию до наблюдателя на Земле, лежат в интервале 0.4 ÷ 40 Ян [1, 44, 45]. Чувствительности радиотелескопа УТР-2 достаточно для уверенной регистрации самых мощных и длительных UED.

С июня по декабрь 2011 г. инфракрасной обсерваторией “Джемини” в атмосфере Урана были зарегистрированы два ярких пятна [49]. Они могли быть связаны с грозовой активностью. Эти два события инициировали поиск UED с помощью наземных радиотелескопов, и в октябре 2011 г. были проведены двухнедельные наблюдения Урана на радиотелескопе УТР-2 с целью детектирования молний. Сигналы молний зафиксиро-

ваны не были. Для поиска был выбран верхний предел обнаружения на уровне  $4\sigma$ , который составил 3.5 Ян.

**3.2. Венера.** Уже более тридцати лет ведутся активные поиски молний на Венере в широком диапазоне длин волн. Несмотря на это, до настоящего времени нет однозначных доказательств существования молний на Венере. Ниже упомянуты наиболее результативные наблюдательные компании.

Самые успешные попытки регистрации молний на Венере в оптическом диапазоне были предприняты с помощью КА “Венера-9” [51, 52] и с помощью наземного 153-сантиметрового телескопа (обсерватория Маунт-Бигелоу, Аризона, США) [53]. В последнем случае в 1993 г. было обнаружено всего 6 вспышек на длинах волн 777.4 и 656 нм с энергией  $10^8 \div 2 \cdot 10^9$  Дж. Аэростатные зонды автоматических межпланетных станций “Вега-1” и “Вега-2” проводили исследование атмосферы Венеры в 1985 г. В результате оба зонда обнаружили на ночной стороне планеты вариации освещенности и световые вспышки, которые могли быть вызваны грозовыми разрядами.

В 1978 г. в ходе исследований КА “Венера-11” и “Венера-12” обнаружили статические разря-

ды во время спуска в атмосфере Венеры. Аналогичные импульсы были зарегистрированы также аппаратом “Пионер–Венера-1” (Pioneer Venus Orbiter) в узкополосных каналах 730 Гц, 5.4 и 30 кГц с ночной стороны планеты (миссия 1979–1992 гг.) [50, 54].

КА “Галилео” во время пролета мимо Венеры в 1990 г. зарегистрировал 9 всплесков в радиодиапазоне (100 кГц ÷ 5.6 МГц) в течение 53 минут. Шесть из них предположительно являются молниями [55].

Космический аппарат “Кассини” при пролетах около Венеры в 1998 и 1999 гг. не зарегистрировал сигналов, подобных земным разрядам молний [56]. Поиск сигналов проводился на частотах выше плазменной частоты ионосферы Венеры (днем – 5 МГц, ночью – 1 МГц). Незначительное количество зафиксированных сигналов не отличалось ни интенсивностью, ни широкополосностью. Авторы работы [56] заключили, что если молнии и существуют на Венере, то они либо очень редкое явление, либо очень отличаются от земных. При условии наличия молний в атмосфере Венеры их скорее всего следует считать междуоблачными (в том числе внутриоблачными) молниями из-за высоты облачного слоя над поверхностью планеты.

Наблюдения магнитной составляющей излучения проводились с помощью КА “Венера-экспресс” в 2006 г. [50, 57]. Во время проводимого мониторинга атмосферы Венеры были зарегистрированы сигналы (предположительно грозовой природы) в частотном диапазоне 42 ÷ 60 Гц с сильной степенью эллиптической поляризации (68 ÷ 95 %) [53].

Несмотря на столь многочисленные наблюдения, все доказательства существования молний пока остаются довольно неубедительными.

**3.3. Марс.** Марсианская атмосфера очень отличается от Земной: она сильно разрежена и содержит малое количество воды (пара). Электростатические разряды в марсианской атмосфере не могут происходить в облачных слоях, т. к. последние очень скудны, непостоянны и существуют только в полярных областях. Марс представляет собой пустыню, подверженную пылевым бурям. Пылевые бури на Марсе случаются очень часто и могут быть местными (площадью  $> 10^2$  км<sup>2</sup>), небольшими ( $> 1.6 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup>), а в редких случаях могут охватывать всю планету.

Их продолжительность может составлять от нескольких минут до нескольких месяцев. На планете распространены и менее масштабные явления – пылевые вихри, которые наблюдаются исключительно в дневное время [3].

Численное моделирование атмосферных процессов на Марсе предсказывает наличие больших электрических полей [58, 59]. Посредством наземных радионаблюдений было зарегистрировано аномально интенсивное микроволновое излучение (на длинах волн 1.35 и 2.8 см) в регионах с повышенной вихревой активностью. Была найдена корреляция между активностью марсианских пылевых штормов и аномально интенсивным микроволновым радиоизлучением [60]. Во время шторма 1978 г. было зафиксировано повышение яркостной температуры в 9 среднеквадратичных отклонений от ее фоновых значений [60].

**3.4. Юпитер.** Молнии на Юпитере впервые были обнаружены в видимом диапазоне на ночной стороне планеты с помощью КА “Вояджер-1” [61]. Анализ данных КА “Вояджер-1” в работе [62] показал, что вспышки наблюдались в окрестности 13°, 49° и 55° ÷ 60° северной широты. Частота обнаружения вспышек составляла  $0.12 \text{ с}^{-1}$  [63]. Источником молний на Юпитере предполагаются водяные облака (облака, содержащие кристаллики льда), которые находятся на высоте, где давление составляет 4 ÷ 5 бар [64]. Необнаружение разрядов молний в радиодиапазоне в атмосфере Юпитера объясняется сильным ионосферным поглощением. Электронная концентрация ионосферы Юпитера, определенная на высоте 1000 км, приблизительно равна  $10^5 \text{ см}^{-3}$  [65]. Поглощение излучения из атмосферы (несколько десятков децибел) происходит в нижних слоях ионосферы Юпитера (по данным КА “Пионер-10” и “Пионер-11”) с электронной концентрацией более  $10^5 \text{ см}^{-3}$  [16]. Кроме того, серьезной помехой для обнаружения молний являются и другие мощные широкополосные источники радиоизлучения, такие как S- и L-излучение Юпитера. Еще одно альтернативное объяснение отсутствия регистрации ED на Юпитере было предложено в работах [66, 67]: молнии на Юпитере могут быть более длительными, чем на Земле и на Сатурне, время разряда может составлять более нескольких миллисекунд.

**3.5. Нептун.** На планете Нептун КА “Вояджер-2” обнаружил только 4 слабых события с характеристиками, свойственными SED и UED [68].

Длительность событий составила  $30 \div 90$  мс, а плотность потока излучения при наблюдениях на Земле – от 0.03 до 0.003 Ян. В атмосфере Нептуна постоянно фиксируется облачная активность в оптическом (на телескопе Хаббл) и инфракрасном (на телескопе Кек II) диапазонах. Считается, что, как и на Уране, грозовые разряды на Нептуне происходят в облаках на уровне атмосферного давления 40 бар [45]. Электронная концентрация ионосферы Нептуна составляет  $\approx 2.5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , что близко к земным значениям. Однако мощность предполагаемых сигналов не превышает мощности UED. Таким образом, из-за удаленности Нептуна от Земли (приблизительно на 30 а. е.) ожидаемая плотность потока излучения молний в два раза меньше плотности потока излучения UED, что делает возможные сигналы от молний на Нептуне недоступными для детектирования современными наземными инструментами.

**3.6. Сравнение характеристик грозовой активности.** Сравнительные характеристики грозовой активности в атмосферах планет Солнечной системы (Венеры, Земли, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна) представлены в табл. 2.

Наиболее продолжительными являются грозы на Сатурне. Размеры облачных штормовых образований в атмосферах планет гигантов (Сатурна и Юпитера) намного превышают земные. Вспышки на планетах-гигантах более продолжительны и имеют большую энергию. Противоречивые данные о грозовой активности на Венере и Нептуне и малоизученные процессы на Уране, которые могут быть связаны с грозовой активностью, вызывают повышенный интерес и стимулируют дальнейшее изучение проблемы.

#### 4. Выводы и перспективы

Наблюдения SED успешно ведутся уже более 30 лет космическими аппаратами и уже более 6 лет [11] с помощью наземных средств. Учитывая загруженность радиотелескопа УТР-2 различными исследовательскими программами, на данный момент не представляется возможным вести постоянный мониторинг SED-активности. Для старта очередной сессии наземных наблюдений используются данные КА “Кассини” о начале грозовой активности. В то время как КА “Кассини” обеспечивает наблюдение сигналов

Таблица 2. Характеристики грозовой активности в атмосферах планет Солнечной системы

Характеристика	Венера	Земля	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Длительность шторма	–	Десятки минут/часы [25]	Дни [25]	Дни/месяцы [25]	Дни [44]	–
Размер шторма, км	–	25 [25]	< 1500 [25]	$10^3 \div 10^4$ [23]*	–	–
Размер области, освещенной вспышкой, км	–	10 [25]	45 ÷ 80 [25]	100 [22]	–	–
Длительность вспышки, мс	–	$(5 \div 8) \cdot 10^{-2}$ [4]	0.5 [25]	< 500 [11]	10 ÷ 300 [30]	30 ÷ 90 [25]
Регистрация в диапазонах:						
оптическом	–	+	+	+	–	–
ОНЧ	–	+	+	–	–	+
ВЧ	–	+	–	+	+	–
Широтная локализация	–	$\pm 60^\circ$ ю.ш./с.ш. [63, 69]	$15^\circ \div 80^\circ$ ю.ш./с.ш. [4]	$35^\circ \pm 5^\circ$ ю.ш./с.ш. [23]	–	–
Частота регистрации вспышек	$2 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [56]	$28 \div 40 \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [45]	$20 \div 400 \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [45]	$0.9 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [45]	–	–
Плотность ионосферы, $\text{см}^{-3}$	$10^3$ [4]	$4 \cdot 10^3$ [4]	$> 10^5$ [64]	$5 \cdot 10^4$ [28]	$5 \cdot 10^4$ [4]	$2.5 \cdot 10^3$ [4]

\* За исключением шторма J.

в диапазоне частот от 0.7 до 16 МГц, радиотелескоп УТР-2 работает в полосе частот  $8 \div 33$  МГц. Кроме того, современная аппаратура и методы наблюдений [8, 9] позволяют записывать данные с высоким временным разрешением (до 15 нс). Такое разрешение необходимо для изучения тонкой временной структуры сигнала, в частности, дает возможность оценить характерную длительность коротких всплесков. В статье [35] представлены результаты радионаблюдений земных междуоблачных молний в 1977 г. на частотах 3, 30, 69, 139 и 295 МГц. Было установлено, что молнии состоят из набора коротких сигналов разной интенсивности. В работе приведены записи излучения молнии длительностью чуть менее секунды ( $\sim 700$  мс). Были также исследованы составляющие импульсы земных междуоблачных молний, записанные приемником DSPZ (в режиме записи “waveform”) с микросекундным временным разрешением. При этом было установлено, что эти импульсы имеют тонкую структуру. Авторы предположили, что каждый короткий импульс связан с пошаговым формированием канала молнии, аналогично главному лидеру молний облако–земля. Выше уже было сказано о сходстве тонкой структуры земных междуоблачных молний и SED. Для дальнейшего изучения природы SED крайне желательно осуществлять мониторинг грозových разрядов на Сатурне с целью получения записей мощных сигналов, на основании которых можно будет проводить более детальное изучение временной структуры молний.

Опыт многолетних наблюдений земных и сатурнианских молний в радиодиапазоне является основой для поиска и изучения грозových разрядов на других планетах.

Наиболее перспективным представляется поиск наземными средствами декаметрового излучения разрядов молний на планете Уран. Планета находится на расстоянии, более чем в 2 раза превышающем расстояние от Земли до Сатурна, и плотность потока излучения от разрядов является относительно низкой ( $\leq 0.4$  Ян) [44]. Регистрация событий с длительностью  $100 \div 200$  мс, по оценкам, возможна на радиотелескопе УТР-2.

Для анализа и понимания природы грозových сигналов следует использовать наблюдения облачной активности атмосферы Урана в инфракрасном диапазоне (например, с помощью телескопа “Кек-II”), в дальнейшем возможна также совместная программа наблюдений с космической обсерваторией “Гершель”.

Вторым кандидатом для поисков ED является Венера, несмотря на противоречивость данных многочисленных экспериментов по поиску излучения таких разрядов. Основания для поиска молний на Венере весьма значительны: мощная атмосфера, близость к земному наблюдателю. Так как наземными телескопами уже были зарегистрированы вспышки (возможно грозовой природы), то для поиска радиоизлучения наиболее результативными могут оказаться совместные наблюдения с использованием оптических телескопов.

Юпитер имеет массивную атмосферу, и наличие в ней молний является установленным фактом. Высокая частота регистрации оптических вспышек (см. табл. 2) делает поиск радиоизлучения на частотах  $20 \div 32$  МГц (УТР-2) и  $20 \div 45$  МГц (УРАН-2) весьма многообещающим. В недалеком будущем (с 2016 г.) пятую планету Солнечной системы будет исследовать КА “Джуно”. Это даст нам возможность проводить совместные наблюдения и для Юпитера. Поиск радиоизлучения ED на Марсе и Нептуне на сегодня не представляет актуальной задачей.

Анализ микросекундных временных масштабов SED в настоящее время осуществляется только с использованием наземных средств наблюдений, обеспечивающих временное разрешение вплоть до 15 нс. Поскольку мониторинг радиоизлучения на остальных планетах Солнечной системы с использованием КА не осуществляется, именно наземные максимально чувствительные радиотелескопы могут обеспечить поиск и изучение грозовой активности на Венере, Марсе, Юпитере и Уране.

Представленная работа частично поддержана программой ANR NT05-1 42530 “Radio-Exopla” и проведена в рамках программы NASU-CNRS PICS “Развитие НЧ радиоастрономии с ультравысокой чувствительностью и разрешением” (Грант 1.33.11). Исследования по данным КА Кассини в лаборатории LESIA поддерживаются CNES (Национальным центром космических исследований Франции). Работа проведена при поддержке Национальной академии наук Украины и Российского фонда фундаментальных исследований в рамках совместного проекта НАНУ–РФФУ “Генерация излучения и ускорение частиц в магнитосферах планет-гигантов и в корональных магнитных арках”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaiser M. L., Desch M. D., Warwick J. W., and Pearce J. B. Voyager Detection of Nonthermal Radio Emission from Saturn // *Science*. – 1980. – Vol. 209. – P. 1238–1240.
2. Baines K. H., Delitsky M. L., Momary T. W., Brown R. H., Buratti B. J., Clark R. N., and Nicholson P. D. Storm clouds on Saturn: lightning induced chemistry and associated materials consistent with Cassini VIMS spectra // *Planet. Space Sci.* – 2009. – Vol. 57. – P. 1650–1658.
3. Yair Y. New results on planetary lightning // *Adv. Space Res.* – 2012. – Vol. 50, No. 3. – P. 293–310.
4. Yair Y., Fischer G., Simxes F., Renno N., and Zarka P. Updated review of planetary atmospheric electricity // *Space Sci. Rev.* – 2008. – Vol. 137, No. 1. – P. 29–49.
5. Levin Z., Borucki W. J., and Toon W. B. Lightning Generation in Planetary Atmospheres // *Icarus*. – 1983. – Vol. 56, Is. 1. – P. 80–115.
6. Rinnet K. Lightning on Other Planets // *Geophys. Res.* – 1985. – Vol. 90. – P. 6225–6237.
7. Konovalenko A. A., Kalinichenko N. N., Rucker H. O., Lecacheux A., Fischer G., Zarka P., Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Griefmeier 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 decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006 // *Icarus*. – 10.1016/j.icarus.2012.07.024
8. Kozhin R. V., Vynogradov V. V., and 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.
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*. – 2010. – Graz (Austria). – P. 521–531.
10. Zakharenko V., Mylostna K., Konovalenko A., Zarka P., Fischer G., Griefmeier 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.
11. Захаренко В. В., Милостная К. Ю., Фишер Г., Коноваленко А. А., Зарка Ф., Гриссмейер Ж.-М., Рябов Б. П., Ваврив Д. М., Рябов В. Б., Рукер Х., Равье П., Сидорчук М. А., Цекони Б., Коффри А., Дени Л., Фабрис К., Кожин Р. В., Муха Д. В., Палье Л., Шнейдер И., Шевченко В. А., Виноградов В. В., Вебер Р., Николаенко В. С. Идентификация молний на Сатурне, зарегистрированных радиотелескопом УТР-2 и космическим аппаратом "Кассини" // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2010. – Т. 15, № 4. – С. 361–368.
12. Warwick J. W., Parce J. B., Evans D. R., Carr T. D., Schauble J. J., Alexander J. K., Kaiser M. L., Desch M. D., Pedersen M., Lecacheux A., Daigne G., Boischoat A., and Barow C. H. Planetary radio astronomy observations from Voyager 1 near Saturn // *Science*. – 1981. – Vol. 212, No. 4491. – P. 239–243.
13. Warwick J. W., Evans D. R., Roming J. H., Alexander J. K., Desch M. D., Kaiser M. L., Aubier M., Leblank Y., Lecacheux A., and Pedersen B. M. Planetary radio astronomy observations from Voyager 2 near Saturn // *Science*. – 1982. – Vol. 215, No. 4532. – P. 582–587.
14. Burns J. A., Showalter M. R., Cuzzi J. N., and Durisen R. H. Saturn's electrostatic discharges: Could lightning be the cause? // *Icarus*. – 1983. – Vol. 54, Is. 2. – P. 280–295.
15. Kaiser M. L., Connerney J. E. P., and Desch M. D. The source of Saturn electrostatic discharges: Atmospheric storms // *NASA Technical Memorandum*. – 1983. – P. 1–19.
16. Zarka P. On detection of radio bursts associated with Jovian and Saturnian lightning // *Astron. Astrophys.* – 1985. – Vol. 146, No. 1. – P. 15–18.
17. Gurnett D. A., Kurth W. S., Hospodarsky G. B., Persoon A. M., Averkamp T. F., Cecconi B., Lecacheux A., Zarka P., Canu P., Cornilleau-Wehrin N., Galopeau P., Roux A., Harvey C., Louarn P., Bostrom R., Gustafsson G., Wahlund J. E., Desch M. D., Farrell W. M., Kaiser M. L., Goetz K., Kellogg P. J., Fischer G., Ladreiter H. P., Rucker H., Alleyne H., and Pedersen A. Radio and Plasma Wave Observations at Saturn from Cassini's Approach and First Orbit // *Science*. – 2005. – Vol. 307, No. 5713. – P. 1255–1259.
18. Porco C. C., Baker E., Barbara J., Beurle K., Brahic A., Burns J. A., Charnoz S., Cooper N., Dawson D. D., Del Genio A. D., Denk T., Dones L., Dyudina U., Evans M. W., Giese B., Grazier K., Helfenstein P., Ingersoll A. P., Jacobson R. A., Johnson T. V., McEwen A., Murray C. D., Neukum G., Owen W. M., Perry J., Roatsch T., Spitale J., Squyres S., Thomas P., Tiscareno M., Turtle E., Vasavada A. R., Veverka J., Wagner R., and West R. Cassini Imaging Science: Initial results on Saturn's rings and small satellites // *Science*. – 2005. – Vol. 307, No. 5713. – P. 1226–1236.
19. Fischer G., Desch M. D., Zarka P., Kaiser M. L., Gurnett D. A., Kurth W. S., Macher W., Rucker H. O., Lecacheux A., Farrell W. M., and Cecconi B. Saturn lightning recorded by Cassini/RPWS in 2004 // *Icarus*. – 2006. – Vol. 183, Is. 1. – P. 135–152.
20. 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. 2. – P. 545–555.
21. Physical properties and detection of Saturn's lightning radio bursts / Zarka P., Cecconi B., Denis L., Farrell W. M., Fischer G., Hospodarsky G. B., Kaiser M. L., and Kurth W. S. / Ed. by H. O. Rucker, W. S. Kurth, and G. Mann. – *Planetary Radio Emissions VI*. – Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 2006. – P. 111–122.
22. 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. – P. L09205.
23. 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.

24. Fischer G., Gurnett D. A., Kurth W. S., Akalin F., Zarka P., Dyudina U. A., Farrell W. M., and Kaiser M. L. Atmospheric Electricity at Saturn // *Space Sci. Rev.* – 2008. – Vol. 137, No. 4. – P. 271–285.
25. Overview of saturn lightning observations / Fischer G., Dyudina U. A., Kurth W. S., Gurnett D. A., Zarka P., Barry T., Delcroix M., Go C., Peach D., Vandebergh R., and Wesley A. / Ed. by H. O. Rucker, W. S. Kurth, P. Louarn, and G. Fischer. – *Planetary Radio Emissions VII.* – Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 2011. – P. 135–144.
26. Del Genio A. D., Achterberg R. K., Baines K. H., Flasar F. M., Read P. L., Sánchez-Lavega A., and Showman A. P. Saturn atmospheric structure and dynamics. In: M. K. Dougherty, L.W. Esposito, and S. M. Krimigis, editors. *Saturn from Cassini-Huygens.* – Atlanta, GA: Springer-Verlag, 2009. – P. 113–159.
27. Vasavada A. R., Hurst S. M., Kennedy M. R., Ingersoll A. P., Porco C. C., Del Genio A. D., and West R. A. Cassini imaging of Saturn: southern hemisphere winds and vortices // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111, Is. E5. – E05004, doi:10.1029/2005JE002563.
28. Fischer G., Gurnett D. A., Zarka P., Moore L., and Dyudina U. A. Peak electron densities in Saturn's ionosphere derived from the low frequency cutoff of Saturn lightning // *J. Geophys. Res.* – 2011. – Vol. 116, Is. A4. – A04315, doi:10.1029/2010JA016187.
29. Porco C. C., Baker E., Barbara J., Beurle K., Brahic A., Burns J. A., Charnoz S., Cooper N., Dawson D. D., Del Genio A. D., Denk T., Dones L., Dyudina U., Evans M. W., Giese B., Grazier K., Helfenstein P., Ingersoll A. P., Jacobson R. A., Johnson T. V., McEwen A., Murray C. D., Neukum G., Owen W. M., Perry J., Roatsch T., Spitale J., Squyres S., Thomas P., Tiscareno M., Turtle E., Vasavada A. R., Veverka J., Wagner R., and West R. Cassini Imaging Science: Initial Results on Saturn's Atmosphere // *Science.* – 2005. – Vol. 307, No. 5713. – P. 1243–1246.
30. Fischer G., Kurth W. S., Dyudina U. A., Kaiser M. L., Zarka P., Lecacheux A., Ingersoll A. P., and Gurnett D. A. Analysis of a giant lightning storm on Saturn // *Icarus.* – 2007. – Vol. 190, Is. 2. – P. 528–544.
31. Zarka P. and Pedersen B. Statistical study of Saturn electrostatic discharges // *J. Geophys. Res.* – 1983. – Vol. 88, Is. A11. – P. 9007–9018.
32. Evans D. R., Warwick J. W., Pearce J. B., Carr T. D., and Schauble J. J. Impulsive radio discharges near Saturn // *Nature.* – 1981. – Vol. 292, No. 5825. – P. 716–718.
33. Fischer G., Gurnett D. A., Lecacheux A., Kurth W. S., and Macher W. The Polarization of Saturn Electrostatic Discharges // *American Geophys. Union, Fall Meeting 2006.* – San Francisco (USA). – 2006. – abstract #P52A-07.
34. Fischer G., Gurnett D. A., Lecacheux A., Macher W., and Kurth W. S. Polarization measurements of Saturn Electrostatic Discharges with Cassini/RPWS below a frequency of 2 MHz // *J. Geophys. Res.* – 2007. – Vol. 112, Is. A12. – A12308, doi:10.1029/2007JA012592.
35. Le Vine D. M., Krider E. P., and Weidman C. D. RF Radiation Produced by Intracloud Lightning Discharges. – Washington: National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Office, 1979. – 12 p.
36. Shao X. and Jacobson A. Polarization observations of lightning-produced VHF emissions by the FORTE satellite // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107, Is. D20. – doi: 10.1029/2001JD001018.
37. Kaiser M. L., Desch M. D., and Connerney J. E. P. Saturn's ionosphere: inferred electron densities // *J. Geophys. Res.* – 1984. – Vol. 89, Is. A4. – P. 2371–2376.
38. Moore L., Nagy A. F., Kliore A. J., Muller-Wodarg I., Richardson J. D., and Mendillo M. Cassini radio occultations of Saturn's ionosphere: Model comparisons using a constant water flux // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – Vol. 33, Is. 22, L22202, doi:10.1029/2006GL027375.
39. Saturn Electrostatic Discharges characteristics, comparison to planetary lightning and importance in the study of Saturn's ionosphere / Zarka P. / Ed. by H. O. Rucker and S. J. Bauer. – *Planet. Radio Emissions.* – Verlag der Akademie der Wissenschaften – Austria: 1984, 237 p.
40. 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. – L06202, doi:10.1029/2006GL028841.
41. Zakharenko V., Mylostna K., Konovalenko A., Kolyadin V., Zarka P., Grißmeier J.-M., Litvinenko G., Sidorchuk M., Rucker H., Fischer G., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Shevchenko V., and Nikolaenko V. Search and study of electrostatic discharges in the Solar System with the radio telescope UTR-2 // *European Planetary Science Congress 2012 "EPSC2012".* – Madrid (Spain). – 2012. – Vol. 7. – P. 105.
42. Available from: <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/2012/>
43. Available from: <http://spaceweather.com>
44. Zarka P. and Pedersen B. M. Radio detection of Uranian lightning by Voyager 2 // *Nature.* – 1986. – Vol. 323. – P. 605–608.
45. Desch M. D. Lightning at planets in the outer Solar system // *Planet. Radio Emissions III Proc. of 3rd International Workshop held.* – Graz (Austria). – 1991. – P. 371–380.
46. Pollack J. B., Rages K., Pope S. K., Tomasko M. G., Romani P. N., and Atreya S. K. Nature of the Stratospheric Haze on Uranus: Evidence for Condensed Hydrocarbons // *J. Geophys. Res.* – 1987. – Vol. 92, Is. A13. – P. 15037–15065.
47. Weidenschilling S. J. and Lewis J. S. Atmospheric and cloud structures in the Jovian planets // *Icarus.* – 1973. – Vol. 20, Is. 4. – P. 465–476.
48. Encrenaz T., Lellouch E., Drossart P., Feuchtgruber H., Orton G. S., and Atreya S. K. First detection of CO in Uranus // *Astron. Astrophys.* – 2004. – Vol. 413. – P. L5–L9, doi: 10.1051/0004-6361:20034637.
49. Sromovsky L. A., Hammel H. B., de Pater I., Fry P. M., Rages K. A., Showalter M. R., Merline W. J., Tamblyn P., Neyman C., Margot J.-L., Fang J., Colas F., Dauvergne J.-L., Gymez-Forrellad J. M., Hueso R., Sánchez-Lavega A., and Stallard T. Episodic bright and dark spots on Uranus // *Icarus.* – 2012. – Vol. 220, Is. 1. – P. 6–22.
50. Zhang T. L., Baumjohann W., Delva M., Auster H.-U., Balogh A., Russell C. T., Barabash S., Balikhin M., Bergerhofer G., Biernat H. K., Lammer H., Lichtenegger H., Magnes W., Nakamura R., Penz T., Schwingenschuh K., Voros Z., Zambelli W., Fornacon K.-H., Glassmeier K.-H., Richter I., Carr C., Kudela K., Shi J. K., Zhao H., Motschmann U., and Lebreton, J.-P. Magnetic field investigation of the Venus plasma environment: expected new results from Venus Express // *Planet. Space Sci.* – 2006. – Vol. 54, Iss. 13–14. – P. 1336–1343.

51. *Hansell S. A., Wells W. K., and Hunten D. M.* Optical Detection of Lightning on Venus // *Icarus*. – 1995. – Vol. 117, Is. 2. – P. 345–351.
52. *Russell C. T. and Scarf F. L.* Evidence for lightning on Venus // *Adv. Space Res.* – 1990. – Vol. 10, No. 5. – P. 125–136.
53. *Bhattacharya A. B., Tripathi D. K., Das T., Nag A., and Sarkar A.* Electrification in the earth and Martian atmospheres with the possibility of global electric circuits // *Int. J. Eng. Sci. Technol.* – 2011. – Vol. 3, No. 4. – P. 3221–3228.
54. *Russell C. T., Strangeway R. J., Daniels J. T. M., Zhang T. L., and Wei H. Y.* Venus lightning: Comparison with terrestrial lightning // *Planet. Space Science*. – 2011. – Vol. 59, No. 10. – P. 965–973.
55. *Gurnett D. A., Zarka P., Manning R., Kurth W. S., Hospodarsky G. B., Averkamp T. F., Kaiser M. L., and Farrell W. M.* Non-detection at Venus of high-frequency radio signals characteristics of terrestrial lightning // *Nature*. – 2001. – Vol. 409, No. 6818. – P. 313–315.
56. *Krasnopolsky V. A.* Lightning on Venus according to information obtained by the satellites Venera 9 and 10 // *Kosmicheskie Issledovaniya*. – 1980. – Vol. 18, No. 3. – P. 429–434.
57. *Gurnett D. A., Kurth W. S., Roux A., Gendrin R., Kennel C. F., and Bolton S. J.* Lightning and plasma wave observations from the Galileo Flyby of Venus // *Science*. – 1991. – Vol. 253, No. 5027. – P. 1522–1525.
58. *Bhattacharya A. B., Tripathi D. K., Das T., Nag A., and Sarkar A.* Electrification in the earth and Martian atmospheres with the possibility of global electric circuits // *Int. J. Eng. Sci. Technol.* – 2011. – Vol. 3, No. 4. – P. 3221–3228.
59. *Renno N. O., Wong A.-S., and Atreya S. K.* Electrical discharges in the Martian dust devils and dust storms // *Sixth International Conference on Mars*. – Pasadena, Ca (USA), 2003. – abstract № 3191.
60. *Renno N. O., Wong A.-S., Atreya S. K., de Pater I., and Roos-Serote M.* Electrical discharges and broadband radio emission by Martian dust devils and dust storms // *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – Vol. 30, No. 22. – doi:10.1029/2003GL017879.
61. *Cook A. F., Duxbury T. C., and Hunt G. E.* First results on Jovian lightning // *Nature*. – 1979. – Vol. 280, No. 5725. – P. 794–801.
62. *Magalhaes J. A. and Borucki W. J.* Spatial distribution of visible lightning on Jupiter // *Nature*. – 1991. – Vol. 349, No. 6307. – P. 311–313.
63. *Gurnett D. A., Shaw R. R., Anderson R. R., Kurth W. S., and Scarf F. L.* Whistlers observed by Voyager 1: Detection of lightning on Jupiter // *Geophys. Res. Lett.* – 1979. – Vol. 6, No. 6. – P. 511–514.
64. *Zarka P., Farrell W., Fischer G., and Konovalenko A.* Ground-based and space-based radio observations of planetary lightning // *Space Sci. Rev.* – 2008. – Vol. 137. – P. 257–269.
65. *Schunk R. W. and Nagy A. F.* *Ionospheres, Physics, Plasma Physics and Chemistry*. – New York: Cambridge University Press, 2000. – 570 p.
66. *Farrell W. M., Kaiser M. L., and Desch M. D.* A model of the lightning discharge at Jupiter // *Geophys. Res. Lett.* – 1999. – Vol. 26, No. 16. – P. 2601–2604.
67. *Farrell W. M.* Planetary radio emission from lightning: discharge and detectability // *Geophys. Monograph. Series*. – 2000. – Vol. 119. – P. 179–186.
68. *Kaiser M. L., Zarka P., Desch M. D., and Farrell W. M.* 1 Restrictions on the characteristics of Neptunian lightning // *J. Geophys. Res.* – 1991. – Vol. 96, Is. S01. – doi: 10.1029/91JA01599.
69. *Rakov V. A. and Uman M. A.* *Lightning: Physics and Effects*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2003. – 698 p.

*К. Ю. Милостна, В. В. Захаренко*

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

ПОШУК ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ГРОЗОВОЇ АКТИВНОСТІ  
НА САТУРНІ ТА ІНШИХ ПЛАНЕТАХ  
СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Проаналізовано результати досліджень грозової активності планет з метою оцінки можливості її реєстрації і вивчення наземними низькочастотними радіотелескопами, такими як УТР-2, радіоінтерферометрами системи УРАН, а також LOFAR (Low Frequency Array), LWA (Long Wavelength Array) та ГУРТ (Гігантський український радіотелескоп).

*К. J. Mylostna and V. V. Zakharenko*

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

SEARCH AND STUDY OF STORM ACTIVITY  
ON SATURN AND OTHER PLANETS  
OF THE SOLAR SYSTEM

This paper analyzes the available results of planetary thunderstorm researches in order to assess the possibility of recording and studying them by low-frequency ground-based radio telescopes, such as the UTR-2, radio interferometer system URAN, and also LOFAR (Low Frequency Array), LWA (Long Wavelength Array) and GURT (Giant Ukrainian Radio Telescope).

*Статья поступила в редакцию 24.01.2013*