

РАДІОАСТРОНОМІЯ І АСТРОФІЗИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra23.01.003>

УДК 523.164

А. А. КОНОВАЛЕНКО

PACS numbers: 95.55.Jz,
95.30.-k, 95.55.-n

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВСЕЛЕННОЙ МЕТОДАМИ НИЗКОЧАСТОТНОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ В УКРАИНЕ

(по материалам доклада на XI Всеукраинском фестивале науки 18 мая 2017 г., г. Киев)

Предмет и цель работы: обзор основных результатов полувекковой деятельности Украины (с акцентом на последнее десятилетие) в области декаметрового радиоастрономии, представление ряда астрофизических открытий в изучении Солнечной системы, Галактики и Метагалактики, демонстрация благоприятных перспектив развития отечественной и мировой низкочастотной радиоастрономии.

Методы и методология: Применены крупнейшие в мире украинские радиотелескопы декаметровых–метровых волн УТР-2, УРАН, ГУРТ в комплексных астрофизических исследованиях различных объектов Вселенной, а также специальные методы радиоастрономических наблюдений, обеспечивающие высокие чувствительность, разрешение, динамический диапазон, помехоустойчивость и эффективность исследований.

Результаты: С наилучшими параметрами экспериментов проведены широкомасштабные долговременные поисковые и мониторинговые исследования низкочастотного радиоизлучения Солнца, планет, солнечного ветра, межзвездной среды, галактического фона и протяженных объектов Галактики, пульсаров, транзиентов, радиогалактик, квазаров. Открыты новые объекты и явления во Вселенной, в частности, области холодной межзвездной среды с ионизованным углеродом и соответствующие спектральные линии рекордно высоковозбужденных атомов на уровнях более 1000, обнаружены 40 неизвестных ранее на низких частотах пульсаров, электростатические разряды в атмосфере Сатурна, сверхтонкая пространственно-частотно-временная структура континуального, импульсного и спорадического радиоизлучения объектов Солнечной системы, Галактики и Метагалактики.

Заключение: Показаны основные достижения отечественной радиоастрономии в декаметровом и метровом диапазонах волн. Созданы, модернизированы и внедрены в регулярные наблюдения крупнейшие в мире радиотелескопы УТР-2, УРАН-1... УРАН-4, ГУРТ, позволившие сделать множество астрофизических открытий, признанных мировой научной общественностью. Украинские радиотелескопы незаменимы, всесторонне востребованы, включены в наземные и наземно-космические радиоастрономические сети и активно используются в международных исследованиях. Имеются благоприятные перспективы дальнейшего развития отечественной и мировой низкочастотной радиоастрономии – одного из наиболее актуальных направлений современной астрономической науки.

Ключевые слова: низкочастотная радиоастрономия, декаметровый и метровый диапазоны радиоволн, радиотелескоп, Солнечная система, Галактика, Метагалактика

1. Введение

Объектом исследований низкочастотной (НЧ) радиоастрономии (как и современной всеволновой астрономии в целом) является Вселенная во всем ее многообразии. Поражают воображение количество типов астрономических объектов и пространственно-временные масштабы Вселенной – от размеров элементарных частиц до мегапарсековых структур со временем жизни

объектов и явлений от наносекунд до миллиардов лет. С этой точки зрения радиоастрономия аналогична оптической астрономии, принципиально отличаясь лишь по диапазону электромагнитного спектра космического излучения, по средствам и методам исследований, а также по получаемым астрофизическим результатам. При этом радиодиапазон (длины волн от километров до миллиметров) также разделяется на поддиапазоны, которые группируются в областях НЧ (километровый, гектометровый, декаметровый, метровый диапазоны волн) и высокочастотной

© А. А. Коноваленко, 2018

(ВЧ) (от дециметров до миллиметров) радиоастрономии. В силу множества разнообразных физических и астрофизических явлений и механизмов электромагнитного излучения формируются разные типы спектров, т. е. зависимости интенсивности излучения от частоты. Нетепловые механизмы излучения важны, прежде всего, для НЧ радиоастрономии, тепловые – для ВЧ и оптической. Таким образом, исследования в разных диапазонах не дублируют друг друга и не конкурируют между собой, а, напротив, являются взаимодополняющими и дающими возможность построения наиболее полной и точной картины Мира. Например, Солнце, температура поверхности которого около 6000 К, в оптическом диапазоне имеет вид ярко-желтого диска размером 30 угл. мин на фоне черного неба (голубой цвет последнего днем есть результат рассеяния света в атмосфере). Рядом находятся яркие точки – планеты и звезды. Если бы наши глаза чувствовали НЧ радиоизлучение, то Солнца не было бы видно вообще, зато солнечная корона с размерами в несколько угловых градусов “светилась” бы весьма ярко и с еще более яркими вспышками на ее фоне. Звезды не были бы видны, зато все небо было бы “раскаленным” в результате нетеплового радиоизлучения межзвездных очень быстрых (релятивистских) электронов. На фоне этого распределенного радиоизлучения было бы видно множество компакт-

ных объектов различной природы, чаще невидимых в оптическом диапазоне (см. далее).

Если оптическое излучение объектов Вселенной наблюдается с помощью телескопов, то радиоизлучение – с помощью радиотелескопов (РТ). Структура последних (рис. 1) достаточно проста и напоминает обычные радиоприемники, телевизоры, мобильные телефоны.

В настоящей обзорной работе представлены основные результаты астрофизических исследований в области НЧ радиоастрономии (декаметровый–метровый диапазон волн) последних лет. Около 10 лет назад автором настоящего обзора была опубликована обзорная статья [1], результаты которой можно сопоставить с современным состоянием НЧ радиоастрономии в Украине и мире. Уже более полувека Украина является мировым лидером в данных исследованиях, давая основную часть информации о радиоизлучении Вселенной на предельно низких частотах, доступных наземной радиоастрономии. Радиоастрономы Украины смогли сделать не только большее количество основополагающих астрофизических открытий, но и показать впечатляющие перспективы радиоастрономии низких частот. Целесообразность этой статьи состоит также в том, что 2017 г. был последним годом выполнения целевой комплексной программы НАН Украины, в первую очередь благодаря которой были получены представленные ниже результаты.

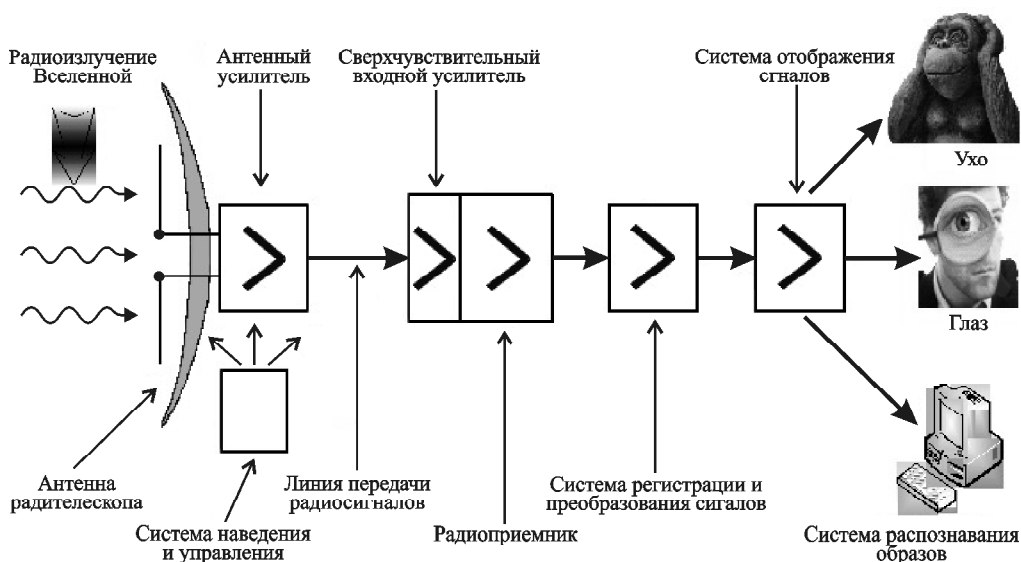


Рис. 1. Схема построения и функционирования РТ

Поскольку представленный обзор был подготовлен для доклада на XI Всеукраинском фестивале науки, все иллюстрации в нем практически идентичны представленным на докладе.

2. Экспериментальная база низкочастотной радиоастрономии

Будучи аналогичными по структуре бытовым приборам, РТ, конечно, существенно отличаются в каждом из звеньев и всегда иллюстрируют наивысшие достижения научно-технического прогресса. Больше всего впечатляют гигантские антенные системы РТ. В первую очередь надо вспомнить до сих пор самые крупные в мире украинские РТ декаметровых волн (частоты $8 \div 32$ МГц) УТР-2 и УРАН [2] (см. рис. 2–4). Конфигурация и размеры РТ УТР-2 показаны на рис. 5. Его гигантская эффективная площадь, равная $150\,000\text{ м}^2$, соответствует суммарной площади 30 футбольных полей!

Размещение всех РТ на территории Украины изображено на рис. 6. Эти РТ, работая синхронно, образуют один сверхгигантский РТ размером порядка 1000 км, который обеспечивает рекордное угловое разрешение – около одной угловой секунды! Еще один аспект, иллюстрирующий научно-технический прогресс, связан с новой регистрирующей аппаратурой для УТР-2 и УРАН [3]. Она не только компактна и экономична в части

финансов и энергопотребления, но и обеспечивает лучшее в мире сочетание антенно-аппаратных параметров в экспериментах (чувствительности, разрешения, динамического диапазона, полосы частот, помехоустойчивости и др.), представленных в табл. 1.

Естественно, уникальные радиоастрономические установки Украины не “свалились с неба”. Около 60 лет назад по инициативе и под руководством выдающегося ученого академика НАН Украины С. Я. Брауде (1911–2003) стала создаваться экспериментальная база НЧ радиоастрономии. Поддержку Президента НАН Украины Б. Е. Патона в создании и развитии отечественной радиоастрономии с 1962 г. и до настоящего времени трудно переоценить. На уникальном фото (рис. 7) показано выездное заседание Бюро Президиума АН УССР (июнь 1971 г.), что было своего рода инаугурацией УТР-2 при его вводе в эксплуатацию. На рис. 8 приведены автографы Б. Е. Патона и других членов Президиума.

РТ УТР-2 и УРАН начали строиться в харьковском Институте радиопроизводства и электроники АН УССР. В 1980 г. было создано отделение радиоастрономии, а в 1985 г. – Радиоастрономический институт НАН Украины под руководством академика НАН Украины Л. Н. Литвиненко.



Рис. 2. РТ УТР-2 (антенна Север-Юг), май 2017 г.



Рис. 3. Антенны Запад-Восток РТ УТР-2 вечером в день осеннего равноденствия, сентябрь 2017 г.



Рис. 4. РТ УРАН-2 (г. Полтава) радиоинтерферометрической системы УРАН

3. Некоторые открытия низкочастотной радиоастрономии

За полвека активного применения уникальных РТ УТР-2 и УРАН (они входят в реестр объектов науки, составляющих национальное достояние страны) получен огромный объем приоритетных научных и научно-технических результатов, признанных мировой радиоастрономической обществен-

ностью. Результаты опубликованы во многих сотнях статей и трудов международных конференций в таких изданиях как Nature, MNRAS, Astronomy and Astrophysics, Astrophysical Journal, Planetary and Space Science, Icarus, Advances in Space Research, Experimental Astronomy, Astronomical Instrumentation, Astronomy Reports, Astronomy Reports Letters, Solar Physics, “Кинематика и физика небесных тел”, “Радиофизика и радиоастрономия”.

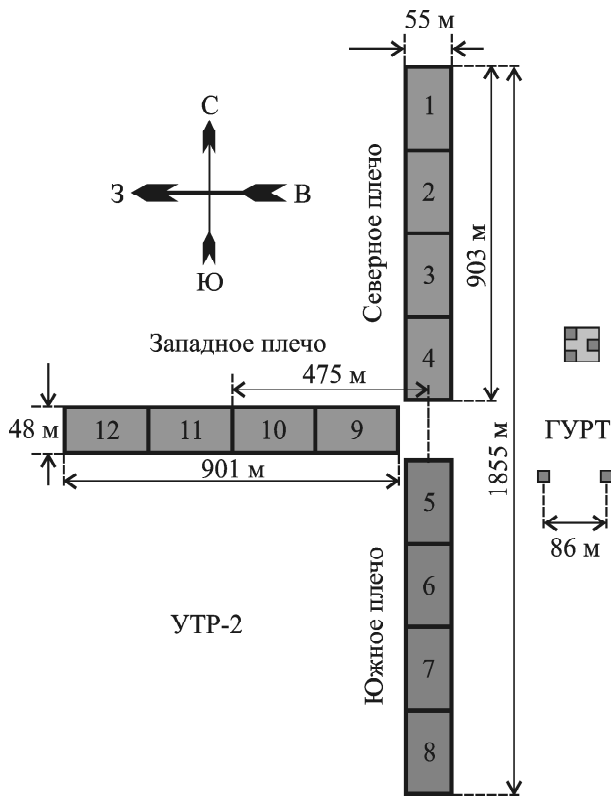


Рис. 5. Конфигурация РТ УТР-2 и ГУРТ

Напомним, что научным открытием принято называть выявление объекта, эффекта или явления, которые ранее не были известны и описаны в научной литературе. По правилам науки (а не лженауки) этот факт должен быть опубликован в авторитетном научном издании, пройдя жесткое рецензирование, должен на международных конференциях и совещаниях. При этом необходимо тщательно и честно представить максимальное количество проверок и исследований, которые подтверждают реальность обнаруженного факта, отвергая артефакты. Естественно, желательно, чтобы впоследствии данная публикация цитировалась, а результат был подтвержден другими исследователями.

Представленные ниже открытия украинских ученых полностью соответствуют указанным требованиям. Оказалось, что НЧ радиоастрономия исключительно информативна. Она позволяет делать открытия и получать новые научные данные, недоступные другим методам астрофизики и относящиеся к широчайшему спектру явлений и пространственно-временных масштабов – от тонких атомных эффектов до эволюции Вселенной в целом, от ближайшего к



Рис. 6. Размещение РТ УТР-2, УРАН, ГУРТ в Украине

Таблица 1. Основные параметры низкочастотных радиотелескопов Украины

Радиотелескоп; принадлежность; координаты (широта/долгота)	Диапазон частот, МГц	Размер, м; максимальная эффективная площадь, м ²	Количество элементов ($l \times m = N$); поляризация	Размер луча на 25 МГц	Расстояние до УТР-2 (LOFAR), км	РСДБ разрешение на 25 МГц (УТР-2 – УРАН)
УТР-2; РИ НАНУ; (49°39'/36°56')	8 ÷ 32 (40)	1800×900; 140000	2040; 1 линейная	0.4°×0.4°	0 (~ 2000)	–
УТР-2 плечо Север-Юг	8 ÷ 32 (40)	1800×53; 105000	6×240 = 1440; 1 линейная	0.3°×12°	0 (~ 2000)	–
	УТР-2 плечо Запад	900×45; 40000	6×100 = 600; 1 линейная	0.6°×12°	0 (~ 2000)	–
УРАН-1; РИ НАНУ; (49°38'/34°50')	8 ÷ 32 (40)	200×29; 5500	4×24 = 96; 2 линейные	5°×30°	42 (~ 1950)	59"
УРАН-2; ПГО НАНУ; (49°38'/34°50')	8 ÷ 32 (40)	238×116; 28000	16×32 = 512; 2 линейные	3.5°×7.5°	150 (~ 1850)	16"
УРАН-3; ФМИ НАНУ; (51°29'/23°50')	8 ÷ 32 (40)	238×58; 14000	8×32 = 256; 2 линейные	3.5°×15°	946 (~ 1100)	2.6"
УРАН-4; РИ НАНУ; (46°24'/30°16')	8 ÷ 32 (40)	238×29; 7000	4×32 = 128; 2 линейные	3.5°×30°	613 (~ 1500)	4"
ГУРТ (одна субрешетка); РИ НАНУ; (49°39'/36°56')	8 ÷ 70 (80)	18×18; 650; (на 10 МГц)	5×5 = 25; 2 линейные	30°×30°	~1 (~ 2000)	–



Рис. 7. Президент НАН Украины Б. Е. Патон и академик НАН Украины С. Я. Брауде во время выездного заседания бюро Президиума АН УССР в обсерватории УТР-2, июнь 1971 г.

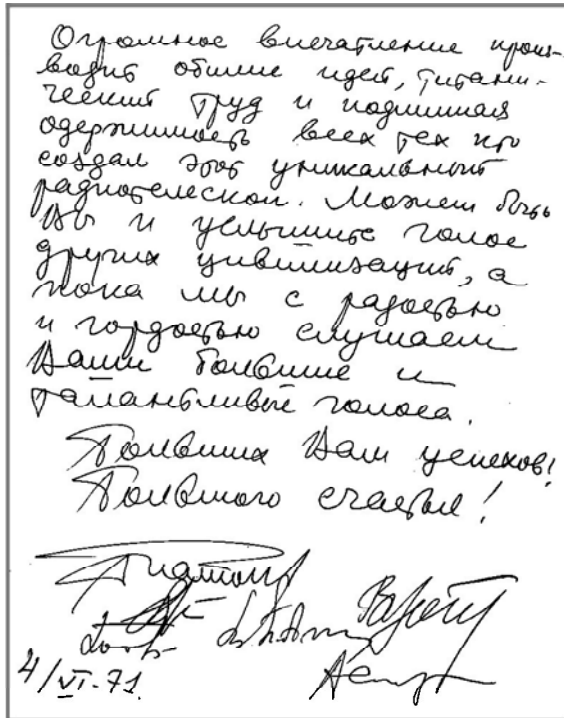


Рис. 8. Автографы членов бюро Президиума АН УССР, июнь 1971 г.

Земле пространства, Солнечной системы, нашей Галактики до самых удаленных радиогалактик и квазаров.

3.1. Солнце

Солнце всегда было, есть и будет важнейшим объектом для исследований во всех диапазонах

электромагнитного спектра. НЧ радиоастрономические исследования на УТР-2 и УРАН позволили выявить множество типов спорадического солнечного радиоизлучения и его новые особенности, включая тонкие частотно-временные структуры. Это иллюстрируется динамическим спектром (трехмерное изображение: время–частота–интенсивность), на котором видно множество всплесков III типа и спайков, т. е. узких по полосе частот и коротких по времени событий, (рис. 9). Наблюдения на предельно низких частотах, доступных наземной радиоастрономии, стали возможными благодаря уникальным параметрам украинских РТ. Удалось зарегистрировать солнечное радиоизлучение даже на частотах менее 10 МГц, что ранее в мире считалось невозможным для наземных инструментов из-за сильного влияния земных помех и ионосферы, особенно в дневное время, когда Солнце только и можно наблюдать.

К исследованиям Солнца тесно примыкает изучение солнечного ветра методом межпланетных мерцаний. Удалось открыть явление мерцаний для межпланетной плазмы даже за орбитой Земли (рис. 10). Методически разделены межпланетные и ионосферные мерцания, обнаружены их дисперсионные зависимости, выявлена многопоточковая структура солнечного ветра. Изучение Солнца и межпланетной среды, особенно на низких частотах, исключительно важно для решения проблем космической погоды и ее прогнозирования.

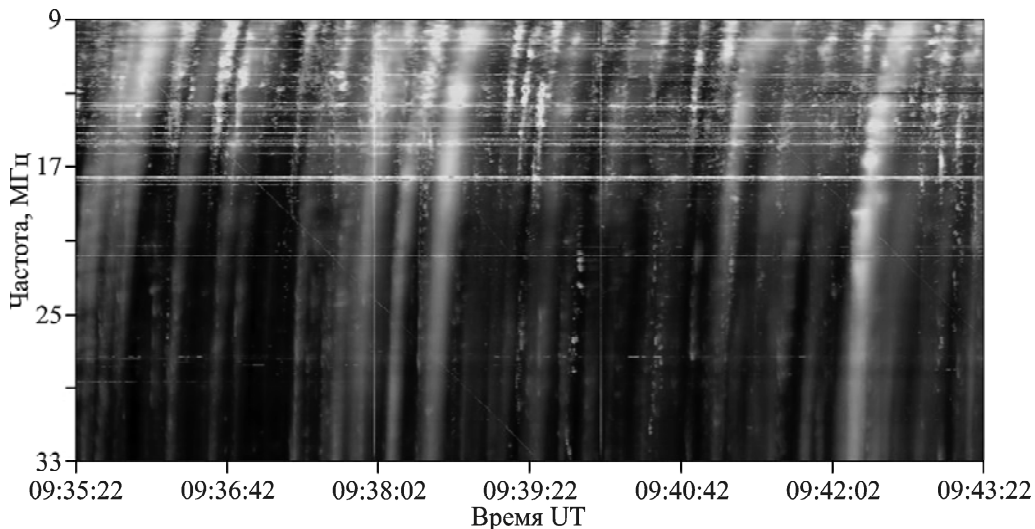


Рис. 9. Открытие новых типов и сверхтонкой структуры декаметрового спорадического солнечного радиоизлучения

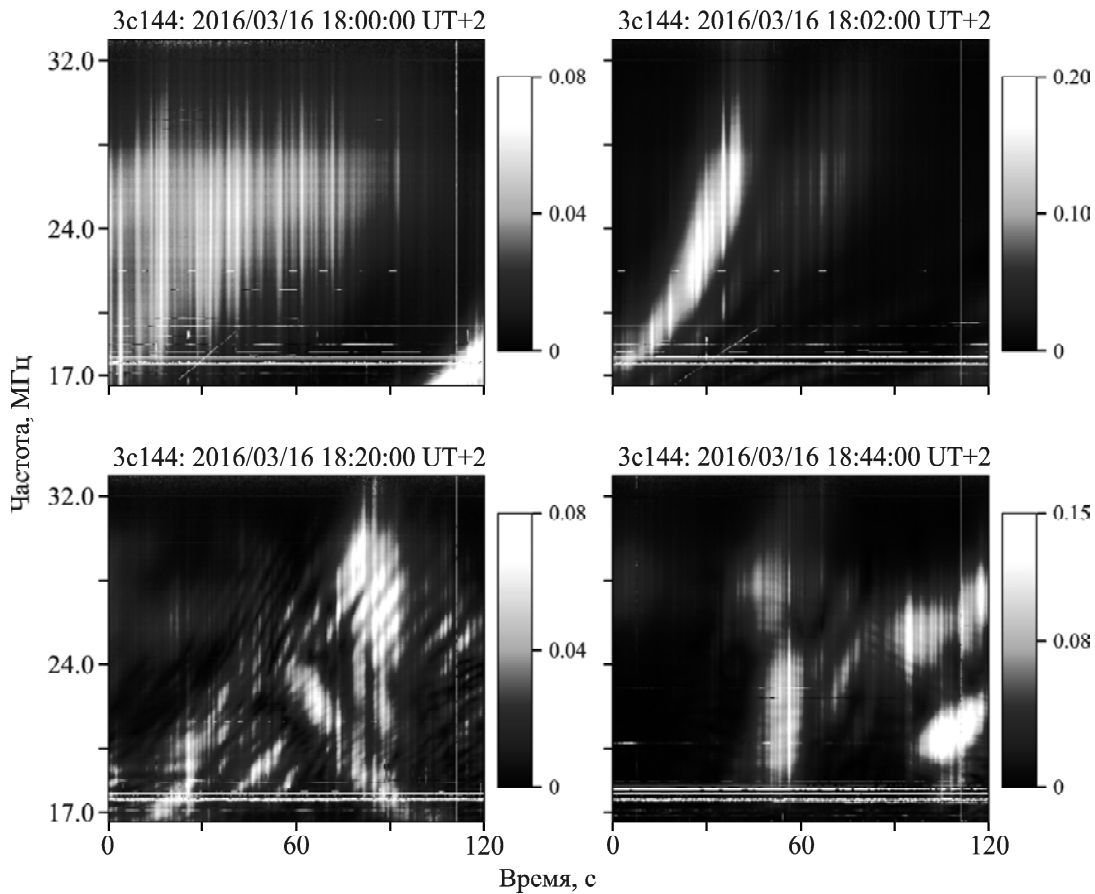


Рис. 10. Межпланетные и ионосферные мерцания, обнаруженные на УТР-2

3.2. Юпитер

Еще одним объектом, уникально генерирующим в ряде случаев весьма интенсивное спорадическое радиоизлучение, является Юпитер. На рис. 11 показаны силовые линии магнитного поля планеты-гиганта, галилеевы спутники, среди которых для радиоастрономии наиболее важен Ио. Система Юпитер–Ио, соединяемая мощной токовой трубкой, ответственна за формирование соответствующего декаметрового излучения на частотах менее 40 МГц. Основной механизм такого излучения объяснен – ускоренные электроны, движущиеся в магнитосфере в направлениях магнитных полюсов, инициируют циклотронную мазерную неустойчивость, что и вызывает радиоизлучение. Вместе с тем детальное объяснение данного феномена пока отсутствует, несмотря на 60-летнюю историю изучения Юпитера на радиоволнах. Поэтому до сих пор наблюдения не утратили своей актуальности, особенно с помощью такого РТ,

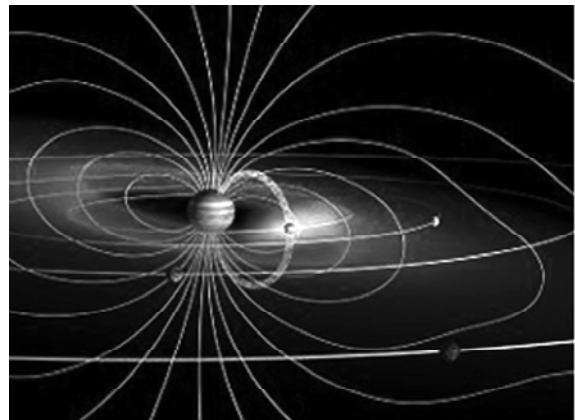


Рис. 11. Упрощенная модель Юпитера и его окружения

как УТР-2. Это иллюстрируется рис. 12, где показаны открытие сверхтонкой частотно-временной структуры S-излучения Юпитера, “зебра”-структуры, и всплески поглощения.

Важность исследований Юпитера, механизмов его излучения и энергетики связана также с тем,

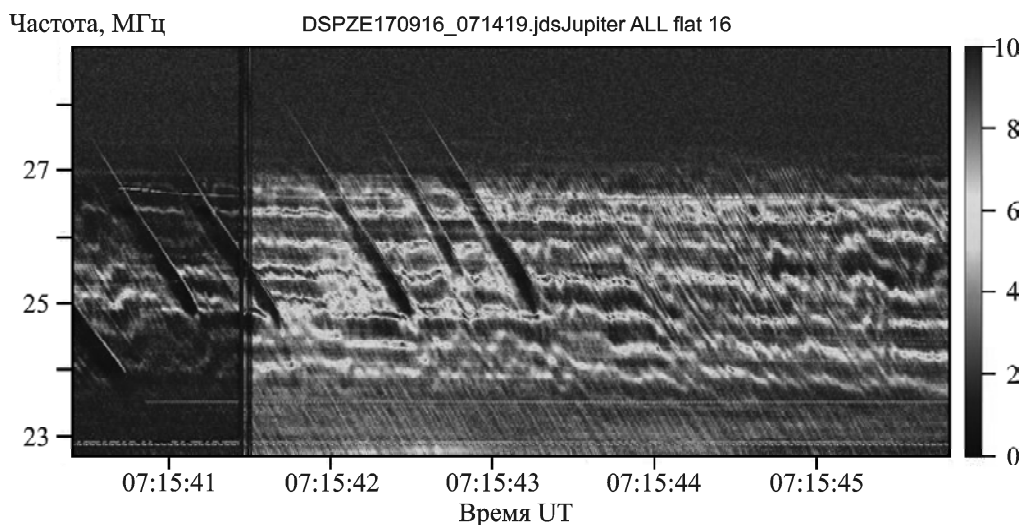


Рис. 12. Обнаружение “зебра”-структур и всплесков поглощения в радиоизлучении Юпитера

что планета-гигант Юпитер должна иметь похожих “двойников” – юпитероподобные экзопланеты (“горячие юпитеры”). Поиск таких планет вблизи других звезд весьма актуален не только с общенаучной точки зрения, но и в проблеме поиска внеземной жизни на планетах, подобных Земле. Большие экзопланеты, похожие на Юпитер, являются своеобразным “щитом жизни”, т. к. в силу своей большой массы притягивают к себе, отводя от планеты с возможной жизнью, опасные большие астероиды, кометы и пр. Примером может служить падение на поверхность Юпитера в 1994 г. большой кометы Шумейкера–Леви.

3.3. Сатурн

В середине 2010-х гг. РТ УТР-2 позволил открыть еще одно необычное явление в планетной радиоастрономии – НЧ импульсные радиосигналы от электростатических разрядов (молний) в атмосфере Сатурна (рис. 13). Сложность эксперимента и важность этого открытия подтверждается тем, что на протяжении 30 лет (с начала 80-х) предпринимались безуспешные попытки обнаружения подобных сигналов на многих РТ мира, и только УТР-2 около 10 лет назад дал положительный результат. Значение данного открытия украинских радиоастрономов определяется не только обнаружением новых сигналов с ненаблюдаемым ранее механизмом излучения и новыми возможностями изучения атмосферы планеты.

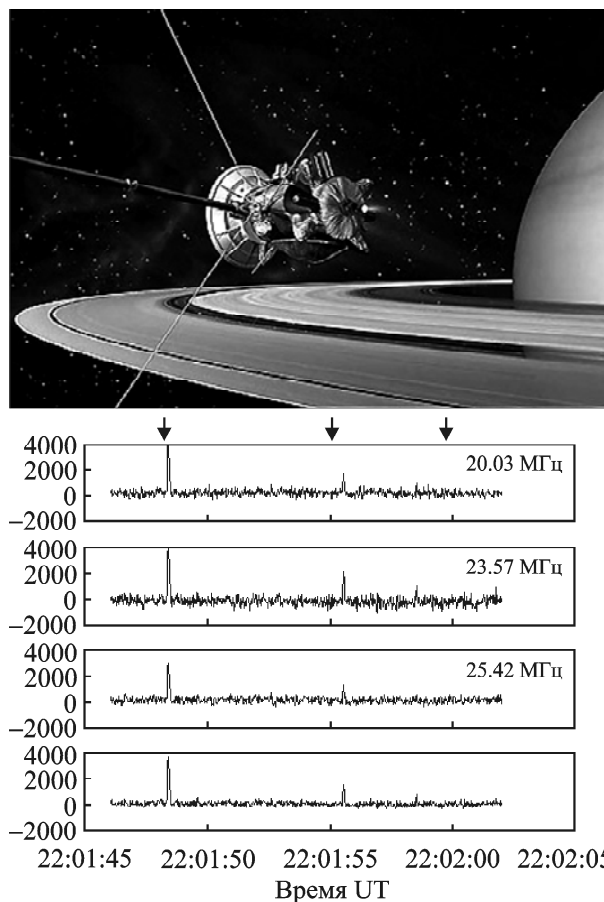


Рис. 13. Наземно-космическое обнаружение и исследования радиоизлучения грозовых разрядов в атмосфере Сатурна

Вывявлены также сверхтонкая структура сигналов субмикросекундных масштабов и их дисперсионное запаздывание на уровне единиц миллисекунд

в межпланетной среде, что важно для ее диагностики. Как подчеркивалось ранее, открытие может считаться таковым, если выполняются хотя бы несколько критериев истинности эффекта. В данном случае лучшие параметры и аппаратно-методические возможности УТР-2 (чувствительность, широкодиапазонность, высокое частотно-временное разрешение, многолучевость, вариативность, помехоустойчивость и т. д.) позволили обеспечить десяток дополнительных подтверждений реальности обнаружения молний на Сатурне. К сожалению, хотя прошло уже 10 лет (результаты опубликованы в журналах *Icarus*, *Planetary and Space Science*, “Радиофизика и радиоастрономия”, доложены на многих конференциях), ни на одном из других РТ это явление пока не зарегистрировано. Исключение составляют исследования на космическом аппарате “Кассини”, который был оснащен приемным комплексом на диапазон $1 \div 16$ МГц и 13 лет находился на орбите вблизи Сатурна. Хотя радиантенна на “Кассини” была малочувствительной (лишь один антенный элемент), благодаря близости к планете (в 500 раз ближе, чем расстояние от Земли до Сатурна) молнии на Сатурне регистрировались вполне уверенно. Это окончательно подтвердило открытие украинских радиоастрономов.

Отметим, что из-за массогабаритных ограничений на космическом аппарате устанавливается упрощенная приемная аппаратура с низкими чувствительностью, частотным и временным разрешениями. Поэтому данные, получаемые на УТР-2, где обеспечены рекордно высокие параметры аппаратуры, являются незаменимыми, особенно в условиях конечного времени жизни любой космической миссии. Аппарат “Кассини” планомерно прекратил свое существование в середине 2017 г. Понятно, что на долгие годы УТР-2 будет оставаться единственным прибором для изучения весьма интересного экзотического явления – радиоизлучения от молний в атмосфере Сатурна.

3.4. Пульсары

Выходя за пределы солнечной системы в нашу Галактику, можно указать еще немало радиоастрономических открытий, сделанных на РТ УТР-2 и УРАН. На рис. 14 показана модель экзотического астрофизического объекта – пульсара. Этот

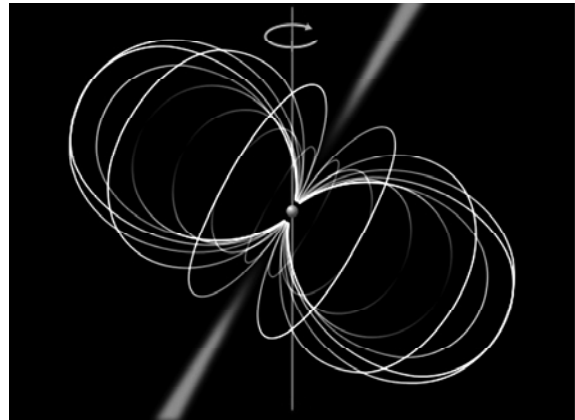


Рис. 14. Упрощенная модель пульсара и механизмов его радиоизлучения

тип объектов был открыт на метровых волнах в Англии Э. Хьюишем и Дж. Белл ровно 50 лет назад, в 1967 г. (за это выдающееся открытие в 1974 г. была присуждена Нобелевская премия). Детектирование строго периодических импульсов вначале вызвало предположение об обнаружении сигналов внеземных цивилизаций. Однако вскоре была доказана естественная природа источника сигналов – им оказалась вращающаяся нейтронная звезда (на рис. 14 показана ось вращения) диаметром всего около 10 км, но с огромной массой, порядка земной, и с периодом вращения порядка 1 с. Магнитная ось смещена, с обоих полюсов, фокусируясь магнитным полем, движутся релятивистские (очень быстрые) заряженные частицы, производящие сравнительно узкий луч радиоизлучения. Когда луч направляется на наблюдателя, последний “видит” этот луч радиоимпульсом (как у маяка).

50 лет назад все астрофизики считали, что на частотах менее 30 МГц излучение пульсара увидеть нельзя из-за “завала” спектра, низкой интенсивности, рассеяния и размытия импульсов в среде распространения, множества помех. Однако очень скоро на РТ УТР-2 удалось обнаружить радиоизлучения нескольких пульсаров. Дальнейший прогресс декаметрового радиоастрономии позволил не только увеличить количество наблюдаемых пульсаров до 40, но и открыть ряд неизвестных эффектов – индивидуальные импульсы (без их усреднения, которое необходимо, если антенна невелика), аномально интенсивные импульсы, их тонкую временную и поляризационную структуру (рис. 15).

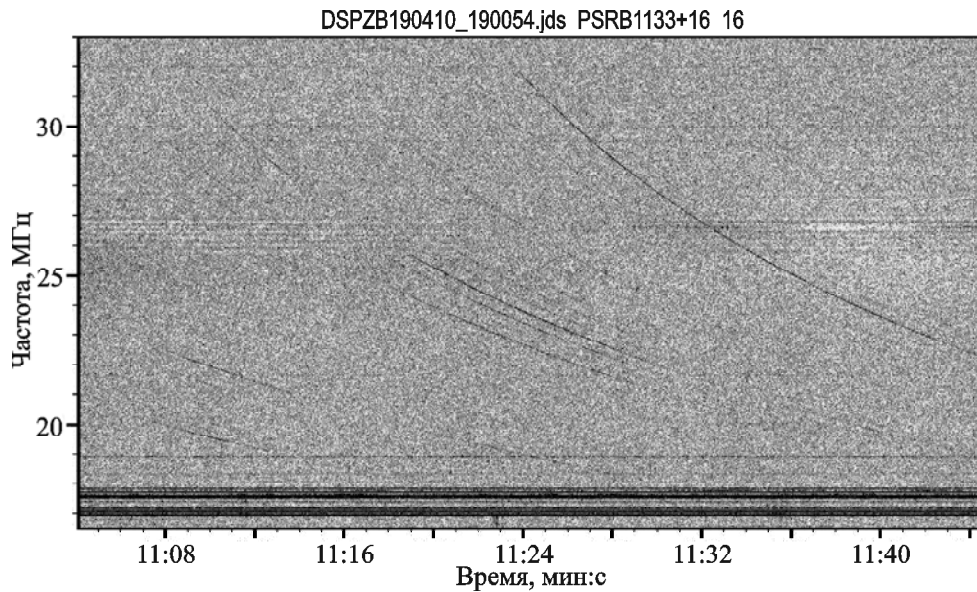


Рис. 15. Обнаружение индивидуальных импульсов пульсара на УТР-2

Важно отметить, что задержка прихода сигналов из-за дисперсии в межзвездной среде (наклон линии на динамическом спектре) на дециметровых волнах в диапазоне от 10 до 30 МГц огромна – до десятков секунд (в дециметровом диапазоне она составляет лишь доли секунды). Это не только позволило существенно уточнить измеренную ранее на ВЧ меру дисперсии в среде, но и открывает новый метод диагностики последней, в частности, позволяет детектировать даже очень далекие неоднородности межзвездной плазмы на луче зрения к пульсару.

3.5. Межзвездная среда

Каждый человек имел удовольствие наблюдать звездное небо и Млечный путь – сгущение звезд к плоскости Галактики (в крупных европейских городах Млечный путь практически не виден из-за сильной подсветки от поверхности Земли) (рис. 16). Черное пространство между звездами – отнюдь не пустота. Там находится множество загадочных материальных сред и веществ – многокомпонентный межзвездный газ, пыль, магнитные поля, излучение различных диапазонов волн, космические лучи. Электронная компонента последних в результате своего движения в магнитных полях создает нетепловое синхротронное радиоизлучение. Интенсивность этого галактического фона резко возрастает с



Рис. 16. Вид фрагмента Млечного пути в оптическом диапазоне

понижением частоты, достигая максимума на дециметровых волнах. Не случайно радиоастрономия как наука родилась именно на этих волнах благодаря Карлу Янскому, открывшему в 1933 г. космическое радиоизлучение, которое оказалось именно галактическим фоном. Яркостная температура радиоизлучения фона весьма велика, на частоте 20 МГц она достигает в среднем 40000 К и растет с понижением частоты со спектральным индексом -2.6 . Напомним, что яркостная температура теплового радиоизлучения поверхности Солнца равна 6000 К, а для планет – порядка сотен градусов, резко уменьшаясь с понижением частоты. На рис. 17 пока-

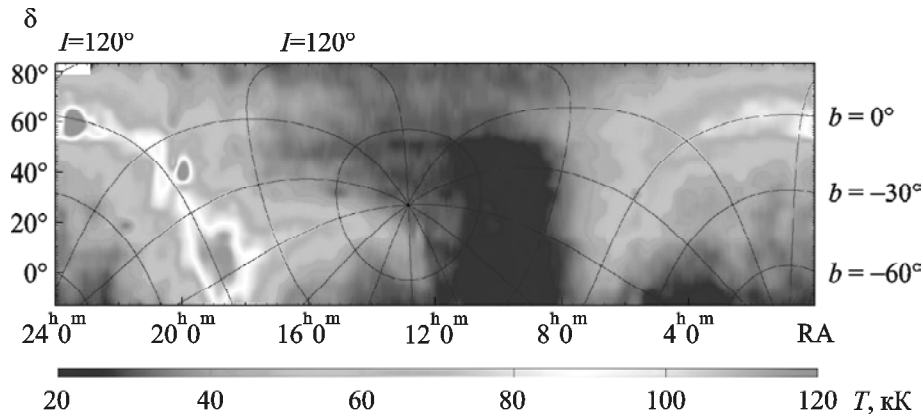


Рис. 17. Нетепловое радиоизлучение Галактики, измеренное на РТ УТР-2 и УРАН-2

зана высокоточная карта нетеплового фона Галактики (в координатах склонение - прямое восхождение), построенная на частоте 20 МГц с комбинированным применением РТ УТР-2 и УРАН-2.

При радиоспектроскопических исследованиях межзвездной среды с помощью УТР-2 около 40 лет назад было сделано важнейшее астрофизическое открытие: неожиданно были обнаружены спектральные линии рекордно высоковозбужденных межзвездных атомов – рекомбинационные радиолинии. Главные квантовые числа атомных уровней, ответственных за формирование линий, огромны – более 1000. При этом размер таких атомов также огромен – до 0.1 мм. Обнаруженный эффект важен как для астрофизики, так и для физической науки в целом. Эти линии стали эффективным незаменимым средством диагнос-

тики холодной межзвездной плазмы и позволяют с высокой точностью определять температуру, плотность, газовое давление, кинематику, механизмы рекомбинации и ионизации, нагрева и охлаждения в межзвездной среде. В последние годы удалось внедрить новый метод спектроскопии на УТР-2. Это одновременное наблюдение огромной серии рекомбинационных линий – от десятков до сотен, что резко повышает чувствительность измерений (рис. 18). За обнаружение и исследования рекомбинационных линий в 1988 г. была присуждена Государственная премия СССР. Еще ранее, в 1977 г., была присуждена Государственная премия СССР за создание РТ УТР-2, а в 1998 г. – Государственная премия Украины за создание системы УРАН.

Хотя настоящая статья является обзорной, ограничения объема не избежать. Выше пред-

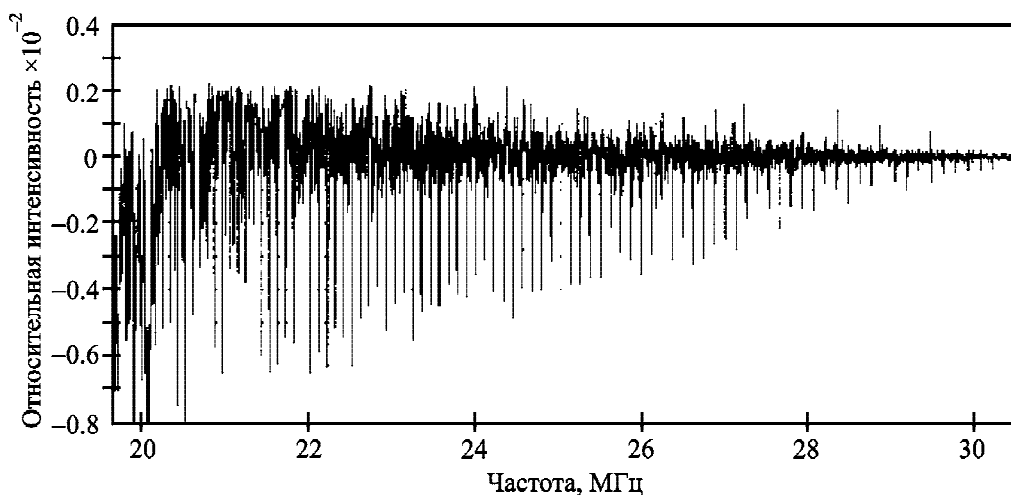


Рис. 18. Широкополосное обнаружение серии радиорекомбинационных линий с помощью УТР-2

ставлены только некоторые открытия отечественной декаметровый радиоастрономии. Практически не даны также ссылки на работы, в которых более детально описаны полученные результаты. Однако в конце этого обзора представлен краткий список публикаций, в каждой из которых имеется достаточное количество ссылок как на работы украинских ученых, так и на статьи зарубежных авторов.

Надо отметить, что около 10 лет назад автор имел честь представить доклад о НЧ радиоастрономии на II Всеукраинском фестивале науки. Представленный здесь обзор дает краткую информацию о состоянии НЧ радиоастрономии в Украине и мире в течение последней декады и о перспективах данной области фундаментальной науки.

4. Развитие низкочастотной радиоастрономии в Украине и мире

Высокая астрофизическая значимость НЧ радиоастрономии и осознание этого факта мировой научной общественностью побудили ведущие радиоастрономические учреждения поставить задачу создания НЧ РТ нового поколения. В Голландии, а также во Франции, Германии, Великобритании, Швеции, Польше создается система LOFAR на частоты $(10)30 \div 80$ МГц и $110 \div 240$ МГц. В штате Нью-Мексико (США) рядом со знаменитой ВЧ системой VLA также создается РТ LWA на диапазон $20 \div 80$ МГц. Пока эта система состоит из 256 элементов, но уже работоспособна.

Украина уже более 50 лет является мировым лидером в области НЧ радиоастрономии. На частотах менее 30 МГц РТ УТР-2 и УРАН остаются незаменимыми и превосходят по основным параметрам и функциональным возможностям зарубежные инструменты, даже вновь создаваемые. Тем не менее для расширения диапазона частот, повышения чувствительности, обеспечения совместимости по диапазону и форматам данных с другими инструментами, для расширения международной кооперации, реализации взаимодополняющих исследований с помощью значительно разнесенных на земном шаре РТ в Украине разработана концепция перспективного развития НЧ радиоастрономии. Она успешно реализуется в рамках целевой комплексной программы НАН Украины “Развитие, создание и

использование крупнейших в мире украинских низкочастотных радиоастрономических элементов и систем” и включает в себя две основные взаимосвязанные составляющие. Первая посвящена модернизации и развитию имеющихся средств. Перечисленные выше астрофизические открытия были бы невозможными без поддержки данной программой. Вторая часть направлена на создание дополнительного НЧ и более широкополосного, чем ранее, РТ нового поколения ГУРТ (Гигантский Украинский РТ) [4]. Он имеет частотную полосу $8 \div 80$ МГц и вместе с УТР-2 и УРАН существенно расширяет диапазон частот, чувствительность, разрешающую способность, функциональные возможности, обеспечивает дальнейшую интеграцию Украины в европейскую и мировую сети современных РТ с соответствующими международными исследованиями. На рис. 19 показан внешний вид субрешеток ГУРТ рядом с УТР-2 в Радиоастрономической обсерватории им. С. Я. Брауде. На рис. 20 демонстрируются возможности новых субрешеток ГУРТ (по 25 элементов в каждой) путем сравнения синхронных наблюдений Солнца на УТР-2 (внизу) и ГУРТ (вверху). Видно, что, несмотря на сравнительно малую площадь одной субрешетки, полученные динамические спектры весьма информативны, а благодаря существенно большей полосе частот ГУРТ удалось зарегистрировать даже вторую гармонику солнечного всплеска II типа.

Было доказано, что на сравнительно малых НЧ антеннах нового поколения, даже таких, как одна субрешетка ГУРТ, можно проводить высококачественные астрофизические исследования во многих направлениях. Это относится к изучению Солнца, межпланетной среды, ионосферы, Юпитера, молний на Сатурне, пульсаров, галактического и метagalacticкого фона, межзвездной среды с помощью рекомбинационных линий, космологических спектральных линий. Такие богатые возможности предопределяются тем, что в антенне нового поколения максимально реализованы высококачественные и эффективные аппаратно-методические параметры и подходы: широкий диапазон частот, высокая чувствительность по яркостной температуре, частотное и временное разрешения, большие динамический диапазон и помехоустойчивость, электронное управление лучом во всей



Рис. 19. Субрешетки сверхширокополосного РТ нового поколения ГУРТ

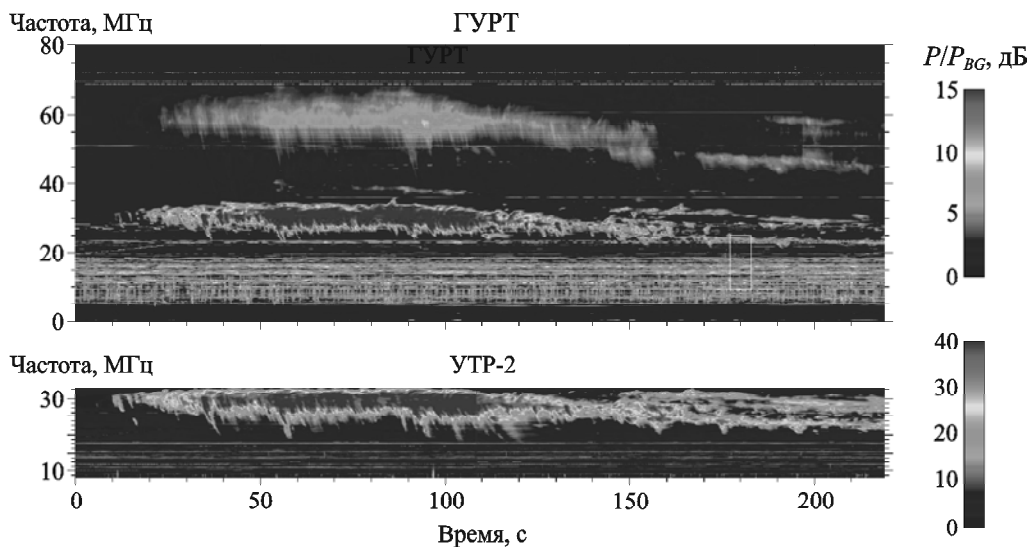


Рис. 20. Синхронные наблюдения солнечных всплесков II типа на РТ УТР-2 и ГУРТ

полусфере по обеим координатам, поляризметрические возможности, непрерывная работа в автоматическом режиме, оптимальное сочетание аналоговой и цифровой аппаратуры, экономичность изготовления и эксплуатации, экологическая безопасность, простота контроля параметров, ремонтпригодность.

Аналогичный подход реализуется во Франции при создании еще одного НЧ РТ нового поколения – Nenu FAR. Тесное многолетнее (более четверти века!) сотрудничество Украины с Францией и Австрией позволило передать отечественный опыт зарубежным партнерам и оптимизиро-

вать создание новых НЧ антенн-решеток и регистрирующей аппаратуры с учетом специфических особенностей и требований радиоастрономии низких частот. Украина официально участвует во французских и австрийских радиоастрономических проектах как при создании и развитии экспериментальной базы, так и в исследованиях с ее помощью (рис. 21, 22). Кроме перечисленных стран, радиоастрономы Украины активно сотрудничают, выполняя совместные проекты, наблюдения, публикации, с Великобританией, Ирландией, Германией, Голландией, Бельгией, Швецией, США, Индией, Японией.



Рис. 21. Визит радиоастрономов Франции для совместных исследований на УТР-2

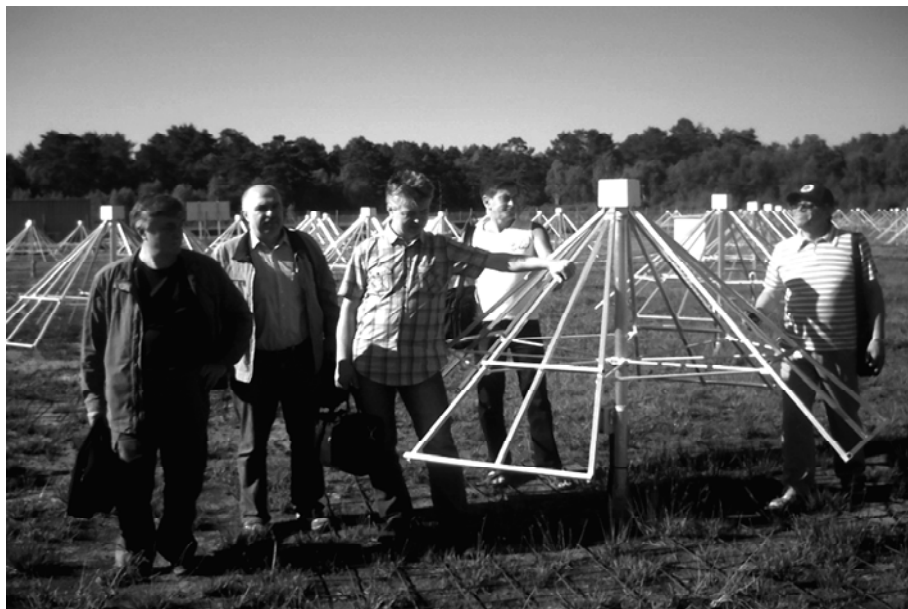


Рис. 22. Украинские радиоастрономы в обсерватории Нансе (Франция) при создании нового PT Nenu FAR

5. Новые методы низкочастотной радиоастрономии

5.1. Наземно-космическая радиоастрономия

В последние годы радиоастрономы Украины активно развивают новые подходы для повышения эффективности НЧ радиоастрономических ис-

следований. Как известно, такие исследования сопряжены с рядом аппаратно-методических и физических ограничений и проблем, которые не свойственны радиоастрономии более высоких частот [5]. Среди них следует назвать высокую яркостную температуру галактического фона, которая определяет чувствительность, т. е. шумовую температуру приемной системы. На ВЧ фон практиче-

ки отсутствует, и шумовую температуру можно резко уменьшить путем глубокого охлаждения приемника до гелиевых температур, чего в принципе нельзя сделать на низких частотах даже в самой смелой фантазии (как “охладить” целую Галактику?!). Огромную проблему создают многочисленные интенсивные помехи разных типов, например, всем хорошо известные сигналы радиостанций в КВ диапазоне и радиосигналы земных молний. Приходящее из космоса радиоизлучение сильно искажается средой распространения, прежде всего ионосферой (высоты над Землей порядка 100 км), которая поглощает, модулирует, рассеивает, отклоняет радиоволны. Наконец, хорошо известно, что угловое разрешение любого телескопа определяется отношением размера последнего к длине волны. Очевидно, что на низких радиочастотах, где длина волны “самая большая в мире”, угловое разрешение при фиксированном размере РТ будет наихудшим. Большой опыт соответствующих исследований в Украине позволил детально изучить мешающие факторы и показать, как их устранить и/или уменьшить, а также правильно отделить помехи от космических естественных радиосигналов.

Понятно, что для того, чтобы уменьшить влияние ионосферы (на частотах менее 10 МГц из-за ее экранирующего влияния практически невозможно регистрировать радиоизлучение) и помех, желательно для наблюдений “уйти” за пределы ионосферы и подальше от Земли. Иными словами, необходимо поставить РТ на космический аппарат и вывести его на удаленную орбиту. Конечно, большой телескоп (как УТР-2, УРАН или ГУРТ) на аппарат поставить нельзя, но один диполь – возможно, что достаточно для ряда задач. Такие проекты уже реализованы, готовятся будущие. Как пример можно назвать уже упомянутый ранее аппарат “Кассини”, хорошо известны миссии WIND, STEREO, совсем новая Juno, готовятся миссии Solar Orbiter, Juice и др. Как было показано в Украине, совершенно новое качество и количество НЧ космических радиоастрономических исследований получается в ходе синхронных наблюдений на космических аппаратах и на крупнейших наземных РТ (это уже наземно-космическая радиоастрономия). Недостаток чувствительности в космических экспериментах с лихвой компенсируется сверхвысокой чувствительностью гигантских РТ УТР-2, УРАН,

ГУРТ. “Сшивка” данных легко обеспечивается перекрытием соответствующих диапазонов частот. У космических инструментов он составляет $\sim 1 \div 15$ МГц, у наземных – $8 \div 32$ МГц (УТР-2, УРАН) и $8 \div 80$ МГц (ГУРТ). Такие наземно-космические эксперименты успешно проводятся, результаты международных исследований опубликованы во многих изданиях. Украинские РТ УТР-2, УРАН, ГУРТ активно участвуют в наземной поддержке новой миссии Juno, аппарат приблизился к Юпитеру в 2016 г. (рис. 23), совместно с известными РТ NDA (Франция), LOFAR (Европа), LWA (США). Особое значение в наземно-космических наблюдениях имеют проекты будущего, когда НЧ РТ будут установлены на обратной стороне Луны. В этом случае полностью будет устранено влияние ионосферы и экранированы любые земные помехи. Кроме того, легче поставить относительно крупный РТ на поверхности Луны, чем создать его в открытом космосе. Одна из подобных международных миссий Farside Explorer планируется к реализации в 2025 г., в подготовке наземной поддержки участвует и Украина.

В НАН Украины существует Совет по космическим исследованиям во главе с Президентом НАН Украины Б. Е. Патонем. Соответствующую целевую программу возглавляет академик НАН Украины Я. С. Яцкив. В 2017 г. начат проект по научно-техническому обоснованию украинской лунной миссии, включая радиоастрономические задачи. Потенциал государственного предприятия «Конструкторское бюро “Южное” им. М. К. Янгеля» позволяет создать соответствующую космическую технику, особенно в кооперации с Европой.

5.2. Многоантенные наблюдения

Мощным методом уменьшения негативных воздействий в НЧ радиоастрономии являются также многоантенные синхронные наблюдения на разнесенных в пространстве антеннах (многоантенная синергия). Поскольку в разных географических пунктах (на расстояниях от сотен до тысяч километров) состояние ионосферы и даже помеховая обстановка сильно различаются, одновременные наблюдения и их сравнение покажут, наблюдаются земные эффекты или сигналы из космоса. Параметры последних должны быть

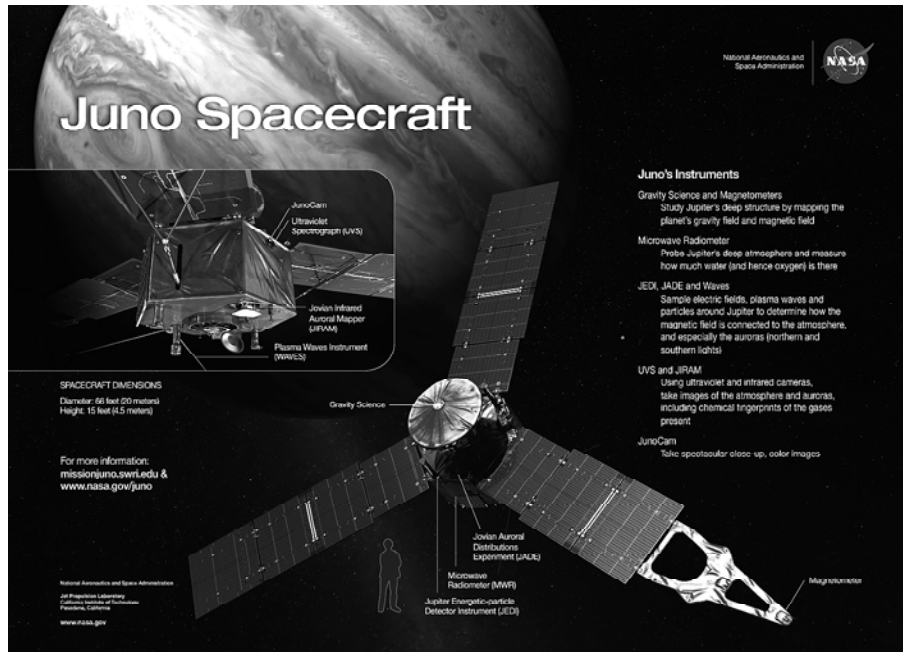


Рис. 23. Космический аппарат Juno (ЕКА–НАСА)

очень близкими друг к другу. Такой режим часто используется на РТ УТР-2, УРАН, ГУРТ, включая методологию радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Эта методология позволяет достичь очень высокого углового разрешения даже на весьма низких частотах. В системе УТР-2+УРАН-1+УРАН-2+УРАН-3+УРАН-4+ГУРТ РСДБ-режим (с максимальной базой около 1000 км) дает угловое разрешение порядка 1 угл. с, что соизмеримо с характеристиками лучших оптических телескопов. Проведены также успешные наблюдения синхронно и координировано с РТ NDA (Франция), LOFAR (Голландия) и даже с антенной на рекордно большом удалении ~10000 км LWA (США).

Радиоастрономическая обсерватория им. С. Я. Брауде (площадь около 140 га) является своего рода природным заповедником. Здесь не ведутся сельскохозяйственные работы (выкашивается только часть травы), не используются химические средства. Имеются богатые флора и фауна, характерные для степной и лесостепной зон нашей страны. Зарубежные радиоастрономы охотно приезжают в обсерваторию для совместных наблюдений и знакомства с природой. Некоторые фрагменты природы в обсерватории показаны на рис. 24, 25.

6. Заключение

Обобщая вышесказанное, надо подчеркнуть, что НЧ радиоастрономия (гектометровый, декаметровый и метровый диапазоны) является одним из наиболее актуальных направлений современной астрономии. На протяжении более полувека Украина остается мировым общепризнанным лидером в этой перспективной области фундаментальной и прикладной науки. Лидерство удастся сохранить и закреплять благодаря существующей всемирно известной школе декаметровой радиоастрономии, правильно сделанному выбору направлений деятельности более 50 лет назад академиком С. Я. Брауде и другими основоположниками отечественной радиоастрономии при поддержке Президента НАН Украины Б. Е. Патона и руководства нашей академии, благодаря имеющемуся коллективу высококвалифицированных специалистов и их огромному аппаратно-методическому, наблюдательному и астрофизическому опыту, тесному международному сотрудничеству, мировому прогрессу НЧ радиоастрономии.

Украинские РТ остаются незаменимыми, востребованными, активно и продуктивно работающими. Обсерватория им. С. Я. Брауде, где находятся УТР-2 и ГУРТ (рис. 26), стала мировым центром декаметровой, а теперь и метровой



Рис. 24. Фрагмент ковыльной степи вблизи УТР-2



Рис. 25. Уголок отдыха в обсерватории

радиоастрономии, дающим основную часть информации о радиоизлучении Вселенной на низких частотах. Украинские РТ интегрированы в европейскую и мировую сети наземной и наземно-космической радиоастрономии. Если учесть и космические миссии с НЧ приемными системами, которые работают синхронно с наземными РТ, то размеры этого виртуального (но реально

функционирующего) РТ впечатляют – до сотен миллионов километров!

Известно, что уже в 1968 г. некоторые части РТ УТР-2 применялись в исследованиях. Таким образом, в 2018 г., в году славных 100-летних юбилеев в жизни Национальной академии наук, будет ровно 50 лет с начала работы этой уникальной установки. Сейчас можно смело утвер-



Рис. 26. РТ УТР-2 и ГУРТ в Радиоастрономической обсерватории им. С. Я. Брауде

ждать, что ее создание и применение на протяжении полувека не были напрасными.

Конечно, в дальнейшем развитии НЧ радиоастрономии есть проблемы, причем, к сожалению, не только аппаратно-методические. Однако радиоастрономы Украины и всего мира не теряют оптимизма, в частности, еще и потому, что будущее этой науки в руках хотя и молодых, но уже квалифицированных радиоастрономов.

Автор выражает благодарность первому вице-президенту Национальной академии наук Украины академику НАН Украины Антону Григорьевичу Наумовцу за предложение подготовить настоящий обзор.

В описанных исследованиях принимал участие большой коллектив научных работников, инженеров и техников Отделения низкочастотной радиоастрономии РИ НАН Украины и зарубежные коллеги, которых автор искренне благодарит. Исследования проводились при поддержке НАН Украины, включая ее целевые программы, а также ряда международных проектов и программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коноваленко А. А. Перспективы низкочастотной радиоастрономии. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2005. Т. 10, спец. вып. С. S86–S114.

2. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovsky V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., and Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. Vol. 42, Is. 1. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x

3. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovsky V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylykivskiy Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., and Griebmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. Vol. 5, Is. 4. id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105

4. Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н., Токарский П. Л., Захаренко В. В., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Степкин С. В., Гридин А. А., Квасов Г. В., Колядин В. Л., Мельник В. Н., Доровский В. В., Калиниченко Н. Н., Литвиненко Г. В., Зарка Ф., Денис Л., Жирар Ж., Рукер Х. О., Панченко М., Станиславский А. А., Христенко А. Д., Муха Д. В., Резниченко А. М., Лисаченко В. М., Борцов В. В., Браженко А. И., Васильева Я. Ю., Скорик А. А., Шевцова А. И., Милостная К. Ю. Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2016. Т. 21, № 2. С. 83–131. DOI: 10.15407/rpra21.02.083
5. Коноваленко А. А. И. С. Шкловский и низкочастотная радиоастрономия. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, № 1. С. 7–30. DOI: 10.15407/rpra22.01.007

REFERENCES

1. KONOVALENKO, A. A., 2005. Low-Frequency Radio Astronomy Prospects. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 10, special is., pp. S86–S114 (in Russian).
2. KONOVALENKO, A., SODIN, L., ZAKHARENKO, V., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPKIN, S., TOKARSKY, P., MELNIK, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., KOLIADIN, V., SHEPELEV, V., DOROVSKYY, V., RYABOV, V., KOVAL, A., BUBNOV, I., YERIN, S., GRIDIN, A., KULISHENKO, V., REZNIHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., REZNIK, A., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., KRISTENKO, A., SHEVCHENKO, V. V., SHEVCHENKO, V. A., BELOV, A., RUDAVIN, E., VASYLIEVA, I., MIROSHNICHENKO, A., VASILENKO, N., OLYAK, M., MYLOSTNA, K., SKORYK, A., SHEVTSOVA, A., PLAKHOV, M., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., LYTVINENKO, O., SHEVCHUK, N., ZHOUK, I., BOVKUN, V., ANTONOV, A., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHIN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A., GRIEBMEIER, J.-M., TAGGER, M., GIRARD, J., CHARRIER, D., BRIAND, C. and MANN, G., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* vol. 42, is. 1, pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x.
3. ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPKIN, S., KOLIADIN, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., DOROVSKYY, V., SHEPELEV, V., BUBNOV, I., YERIN, S., MELNIK, V., KOVAL, A., SHEVCHUK, N., VASYLIEVA, I., MYLOSTNA, K., SHEVTSOVA, A., SKORYK, A., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., PLAKHOV, M., VASILENKO, N., VASYLKIVSKYI, Y., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., RYABOV, V., REZNIHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHYN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A. and GRIEBMEIER, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* vol. 5, is. 4, id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
4. KONOVALENKO, A. A., YERIN, S. M., BUBNOV, I. N., TOKARSKY, P. L., ZAKHARENKO, V. V., ULYANOV, O. M., SIDORCHUK, M. A., STEPKIN, S. V., GRIDIN, A. O., KVASOV, G. V., KOLIADIN, V. L., MELNIK, V. M., DOROVSKYY, V. V., KALINICHENKO, M. M., LITVINENKO, G. V., ZARKA, P., DENIS, L., GIRARD, J., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., STANISLAVSKY, A. A., KRISTENKO, A. D., MUKHA, D. V., REZNIHENKO, O. M., LISACHENKO, V. N., BORTSOV, V. V., BRAZHENKO, A. I., VASYLIEVA, I. Y., SKORYK, A. O., SHEVTSOVA, A. I. and MYLOSTNA, K. Y., 2016. Astrophysical studies with small low-frequency radio telescopes of new generation. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 21, no. 2, pp. 83–131 (in Russian). DOI: 10.15407/rpra21.02.083
5. KONOVALENKO, A. A., 2017. I. S. Shklovsky and Low-Frequency Radio Astronomy. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 22, no. 1, pp. 7–30 (in Russian). DOI: 10.15407/rpra22.01.007

A. A. Konovalenko

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

INVESTIGATION OF THE UNIVERSE BY THE LOW-FREQUENCY RADIO ASTRONOMY METHODS IN UKRAINE

(According to the report on the XI All-Ukrainian Festival
of Science of 18 May 2017, Kyiv)

Purpose: overview of the main results of half a century activities of Ukraine (with emphasis on the last decade) in the field of decameter radio astronomy, presenting a number of astrophysical discoveries in the study of the Solar system, Galaxy and Metagalaxy, demonstration of favorable prospects for the Ukrainian and world-wide low-frequency radio astronomy.

Design/methodology/approach: The world-largest Ukrainian decameter wavelength radio telescopes UTR-2, URAN, GURT in comprehensive studies of various astrophysical objects in the Universe, as well as special techniques of radio astronomy observations, providing high sensitivity, resolution, dynamic range, noise immunity and research efficiency were applied.

Findings: Extensive search efforts and long-term monitoring studies of low-frequency radio emission were made with the best parameters of the experiments for the Sun, planets, solar wind, interstellar medium, galactic background and of extended objects, pulsars, transients, radio galaxies, and quasars. New objects and phenomena in the Universe were opened, in particular, the regions of the cold interstellar medium with ionized carbon, and the corresponding spectral lines of recordly high excited atoms at levels more than 1000, found 40 earlier unknown at low frequencies pulsars, electrostatic discharges in the

atmosphere of Saturn, ultra-slim space-frequency-temporal structures of continuous, pulsed and sporadic radio emission of objects in the Solar system, Galaxy and Metagalaxy.

Conclusions: The main achievements of the national radio astronomy at decameter and meter wavelengths are shown. The world's largest radio telescopes UTR-2, URAN-1...URAN-4, GURT are created, upgraded, and implemented in ground monitoring, which made many astrophysical discoveries recognized by the world scientific community. Ukrainian radio telescopes are indispensable, fully popular and included in the ground and ground-space radio astronomy network and widely used in international studies. There are favourable prospects for further development of Ukrainian and international low-frequency radio astronomy – one of the most important areas of modern astronomical science.

Key words: low frequency radio astronomy, decameter and meter bands of radio waves, radio telescope, Solar System, Galaxy, Metagalaxy

О. О. Коноваленко

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ВСЕСВІТУ МЕТОДАМИ
НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ РАДІОАСТРОНОМІЇ В УКРАЇНІ
(за матеріалами доповіді на XI Всеукраїнському фестивалі
науки 18 травня 2017 р., м. Київ)

Предмет і мета роботи: огляд основних результатів півстолітньої діяльності України (з акцентом на останнє десятиріччя) в області декаметрової радіоастрономії, демонстрація низки астрофізичних відкриттів у вивченні Сонячної системи, Галактики і Метагалактики, демонстрація сприятливих перспектив розвитку вітчизняної і світової низькочастотної радіоастрономії.

Методи і методологія: Застосовано найбільші в світі українські радіотелескопи декаметрових–метрових хвиль

УТР-2, УРАН, ГУРТ у комплексних астрофізичних дослідженнях різних об'єктів Всесвіту, а також спеціальні методи радіоастрономічних спостережень, що забезпечують високі чутливість, роздільну здатність, динамічний діапазон, завадостійкість та ефективність досліджень.

Результати: З найкращими параметрами експериментів виконано широкомасштабні довготривалі пошукові та моніторингові дослідження низькочастотного радіовипромінювання Сонця, планет, сонячного вітру, міжзоряного середовища, галактичного фону і протяжних об'єктів Галактики, пульсарів, транзієнтів, радіогалактик, квазарів. Відкрито нові об'єкти та явища у Всесвіті, зокрема, області холодного міжзоряного середовища з іонізованим вуглецем та відповідні спектральні лінії рекордно високозбуджених атомів на рівнях понад 1000, виявлено 40 невідомих раніше на низьких частотах пульсарів, електростатичні розряди в атмосфері Сатурна, надтонка просторово-частотно-часова структура континуального, імпульсного і спорадичного радіовипромінювання об'єктів Сонячної системи, Галактики і Метагалактики.

Висновки: Показано основні досягнення вітчизняної радіоастрономії в декаметровому і метровому діапазонах хвиль. Створені, модернізовані і впроваджені в регулярні спостереження найбільші в світі радіотелескопи УТР-2, УРАН-1 ... УРАН-4, ГУРТ, котрі дозволили зробити безліч астрофізичних відкриттів, визнаних світовою науковою спільнотою. Українські радіотелескопи незамінні, всебічно затребувані, включені до наземних і наземно-космічних радіоастрономічних мереж і активно використовуються в міжнародних дослідженнях. Є сприятливі перспективи подальшого розвитку вітчизняної і світової низькочастотної радіоастрономії – одного з найактуальніших напрямків сучасної астрономічної науки.

Ключові слова: низькочастотна радіоастрономія, декаметровий і метровий діапазони радіохвиль, радіотелескоп, Сонячна система, Галактика, Метагалактика

Статья поступила в редакцию 16.11.2017