

Перспективы низкочастотной радиоастрономии

А. А. Коноваленко

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

Статья поступила в редакцию 2 ноября 2005 г.

Описаны состояние и основные тенденции развития радиоастрономии. Главное внимание уделено прошлому, настоящему и будущему радиоастрономии декаметровых волн. В этой области Украина имеет наивысший потенциал и крупнейшие в мире радиотелескопы УТР-2 и УРАН. Обосновывается концепция применения существующих радиотелескопов для апробации и развития проекта LOFAR, направленного на создание в ближайшем будущем гигантских низкочастотных радиотелескопов нового поколения.

1. Введение

Радиоастрономия является одной из наиболее бурно прогрессирующих областей фундаментальной науки, обогатившей знания о Вселенной результатами и фактами первостепенного значения. Есть веские основания считать, что дальнейший прогресс радиоастрономии даст новые открытия, важные как для астрофизики, так и для физической науки в целом.

Украина занимает достойное место в ряду ведущих радиоастрономических держав мира благодаря множеству научных и технических результатов приоритетного характера, наличию весьма совершенных радиоастрономических инструментов различных диапазонов волн, соответствующих мировому уровню или его превосходящих. На рис. 1 схематично показана шкала электромагнитного спектра от наиболее длинных радиоволн (декаметровых) до самых коротких (миллиметровых) и крупнейшие украинские радиоастрономические антенны, диапазон работы которых, как видно, перекрывает весь радиоспектр. Указаны также принадлежность антенн и основные организации, ответственные за их оснащение и применение.

В настоящем кратком обзоре представлены тенденции развития радиоастрономии различных диапазонов волн с акцентом на радиоастрономию предельно низких частот, где Украина имеет давние традиции и высокий потенциал.

2. Радиоастрономия XXI века

В августе 2003 г. в Будапеште состоялся симпозиум Европейского астрономического общества “Радиоастрономии 70 лет: от Карла Янского до микроянского”. На нем подводились основные итоги радиоастрономической деятельности за 70 лет и обсуждались главные научные результаты. Не меньшее внимание уделялось развитию радиоастрономии.

Радиоастрономия всегда активно впитывала в себя достижения науки и техники, в свою очередь оказывая и обратное влияние. Радиоастрономические антенны – это одни из наиболее сложных и дорогих сооружений, используемых человеком. Приемники радиоастрономических сигналов – наиболее чувствительные устройства радиофизики и радиотехники. Специфические методы и техника регистрации, хранения и обработки радиоастрономической инфор-

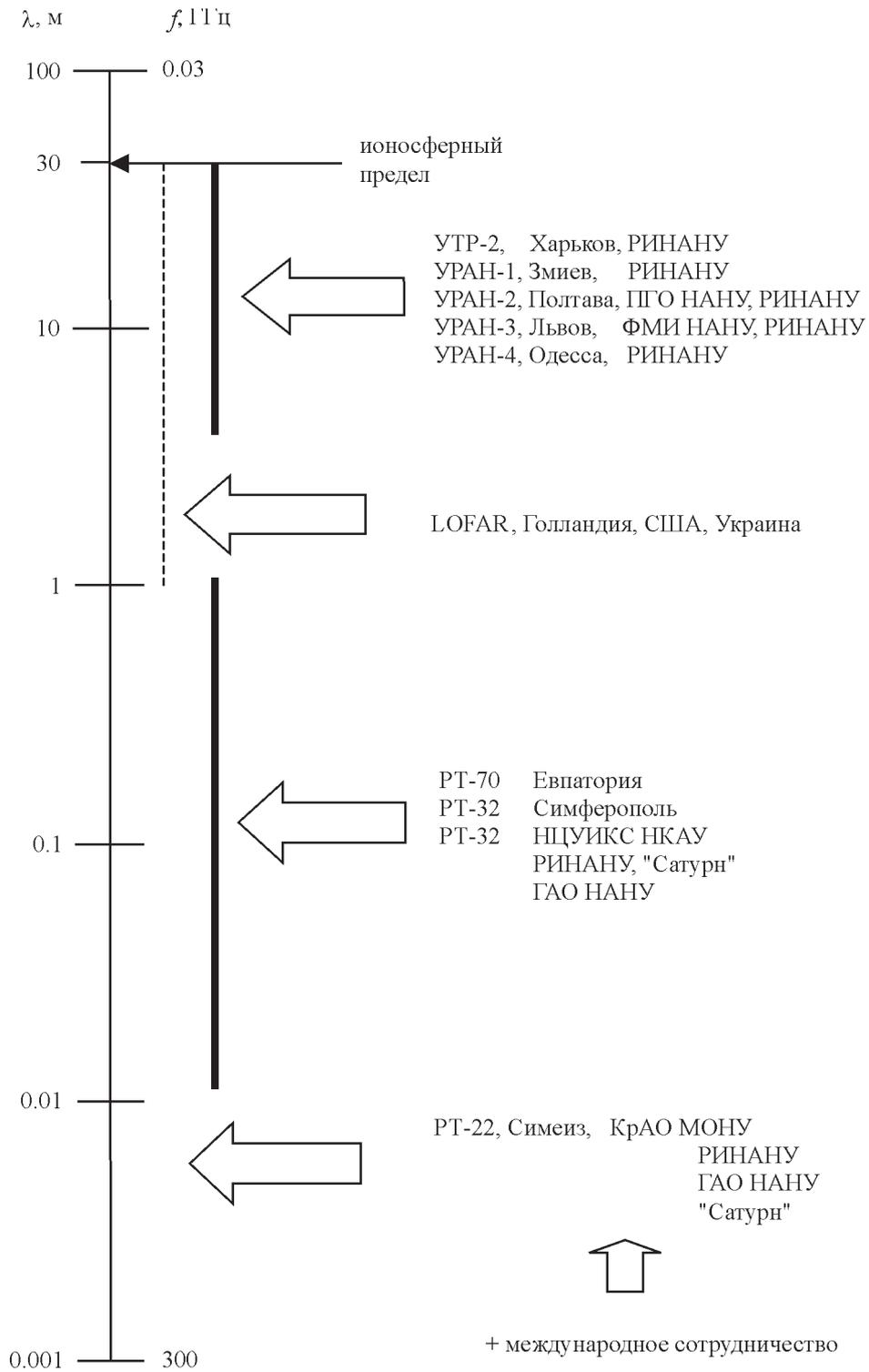


Рис. 1. Радиоастрономические средства Украины

мации существенно повышают эффективность исследований.

Прогресс электронной, компьютерной техники, средств телекоммуникаций и ин-

формационных технологий способствует развитию радиоастрономии сейчас и будет содействовать ее совершенствованию в будущем.

Укажем следующие основные тенденции перспективного развития средств и методов радиоастрономии.

Прежде всего, остается актуальной модернизация существующих радиотелескопов. Внедрение сверхчувствительных приемников нового поколения на антенных системах позволяет резко поднять эффективность исследований даже без увеличения размеров антенн. Такие приемники создаются, в частности, на базе НЕМТ-транзисторов и имеют собственную шумовую температуру (в неохлаждаемом варианте) до 10 К (“классические” транзисторы обеспечивают шумовую температуру до сотен кельвин). При охлаждении до температуры жидкого гелия такие приемники имеют собственный шум порядка единиц кельвин.

Особо следует сказать о создании и внедрении регистрирующих средств нового поколения. Прогресс цифровой техники столь велик, что возможности новых регистраторов на ее основе весьма впечатляющи. Цифровые регистраторы и анализаторы сигналов уже сейчас обеспечивают полосы анализа до 100 МГц (в недалеком будущем – до 1000 МГц) при числе эквивалентных каналов до 10^6 , временном и частотном разрешении менее 1 мкс и 1 кГц соответственно и большом динамическом диапазоне (> 70 дБ).

Как всегда актуальны применение и развитие в радиоастрономии дециметровых и миллиметровых волн методов апертурного синтеза и радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), которые обеспечивают угловое разрешение (до 10^{-4} угловой секунды), как у гипотетического радиотелескопа с диаметром, приближающимся к диаметру Земли. Перспективы этого направления связаны с улучшением параметров антенн и приемных средств, включением в локальную и глобальную сети на постоянной основе новых антенн, что дает увеличение чувствительности и повышение качества построения радиоизображений (заполнение UV -плоскости). Последний подход активно реализуется в Украине (см. рис. 1), где имеются крупные антенны РТ-70 (Евпатория), РТ-32 (Симферополь), РТ-32 (Евпатория), РТ-22 (Симеиз) и ряд других антенн (рис. 2, 3, 4). Так, в течение

последних 10 лет в РИ НАНУ под эгидой Национального космического агентства (НКАУ) разрабатывается и реализуется концепция комплексного радиоастрономического освоения, оснащения и применения антенны РТ-70 (Евпатория, НЦУИКС-НКАУ) для наземно-космической радиоастрономии. Внедрены высокочувствительные криогенные приемные комплексы диапазонов 92, 18, 13, 6, 3.5, 1.35 см (разработка НПО “Сатурн”, г. Киев) и разнообразная регистрирующая аппаратура. Начаты и готовятся исследования в следующих режимах и по следующим научным программам, включая международные:

- автономные (single-dish) исследования галактических и внегалактических объектов в континууме и спектральных линиях;
- РСДБ-исследования в локальных и глобальных сетях;
- наземно-космическая радиоинтерферометрия (см. далее);
- РСДБ-радиоастрометрия, геодинамика, навигация, координатно-временное обеспечение;
- исследование межпланетной среды методом просвечивания сигналами естественных и искусственных радиоисточников;
- радиолокация естественных и искусственных объектов солнечной системы (планеты, астероиды, космический мусор), в том числе с использованием РСДБ-технологий;
- прием телеметрических сигналов международных миссий дальнего космоса.

Международное радиоастрономическое сообщество (Европейская РСДБ-сеть) и Европейское космическое агенство заинтересованы в перспективном совместном с Украиной использовании комплекса РТ-70.

Сейчас в мире активно создаются и внедряются новые средства РСДБ-регистрации и обработки. Система нового поколения Mark V позволяет отказаться от громоздких носителей на магнитных лентах, что повышает эффективность наблюдений и обработки данных. Особое значение имеет внедрение в РСДБ-сеть современных средств телекоммуникаций и информационных технологий (оптоволоконных линий передачи, спутниковых каналов связи, полной автоматизации экспериментов), обеспечение РСДБ реального времени. Состояние и перспективы раз-



Рис. 2. Радиотелескоп RT-70, г. Евпатория



Рис. 3. Радиотелескоп RT-32, г. Симферополь



Рис. 4. Радиотелескоп RT-22, п. Симеиз

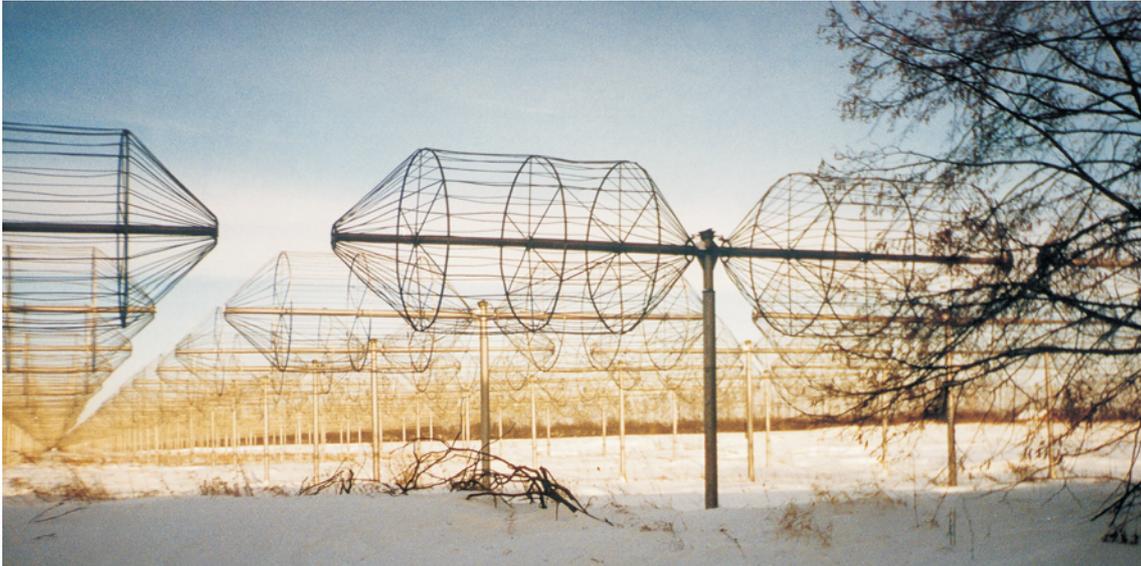


Рис. 6. Радиотелескоп УТР-2, г. Харьков



Рис. 7. Низкочастотные радиотелескопы на карте Европы



Рис. 10. 30-элементная антенна-решетка из активных диполей на обсерватории УТР-2

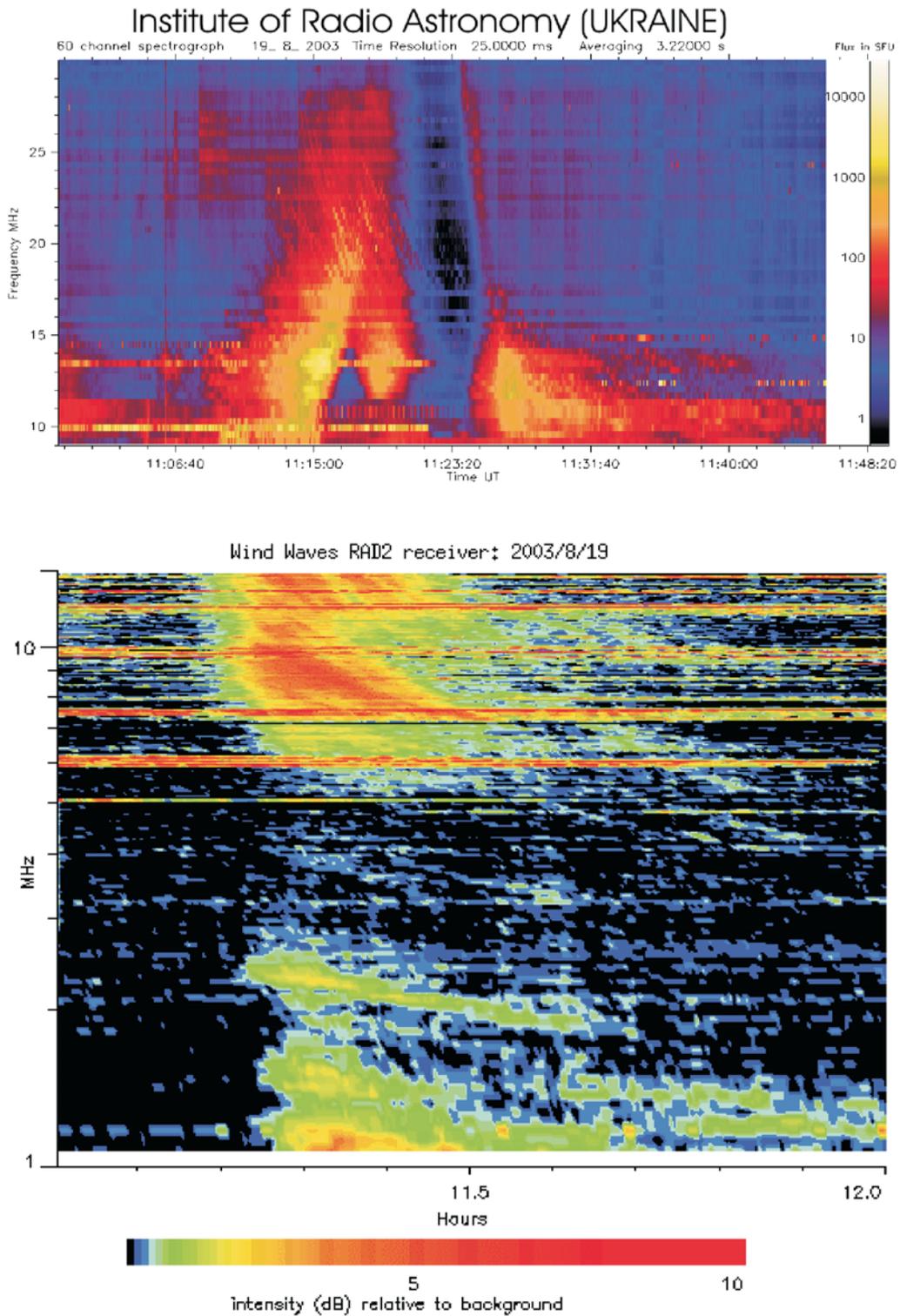


Рис. 13. Одновременные наблюдения всплеска поглощения на УТР-2 (вверху) и космическом аппарате WIND (внизу)

вития данного подхода (уже существует термин е-радиоастрономия – электронная радиоастрономия), в недалеком будущем обеспечат принципиально новые возможности как в организации экспериментов, так и в решении новых астрофизических задач.

Ключевым направлением развития РСДБ-методов является наземно-космическая радиоинтерферометрия. Угловое разрешение наземных сетей РСДБ ограничивается диаметром Земли (12000 км). В то же время решение многих актуальных задач физики, астрофизики и космологии требует разрешения на 1-2 порядка выше (до 10^{-6} угловой секунды), для чего необходимы базы около 100000 км. Очевидно, что реализовать такое разрешение можно только путем вывода хотя бы одного из радиотелескопов на космическую орбиту с соответствующим апогеем. Наземные радиотелескопы при этом работают синхронно с космическим в наземной и наземно-космической РСДБ-сетях. Несмотря на кажущуюся сложность проекта, он уже реализован. Первый космический радиотелескоп диаметром 10 м (КРТ-10) был выведен на орбиту в СССР в 1979 г. Тестовый наземно-космический РСДБ-эксперимент с помощью телекоммуникационного спутника TDRS осуществлен в середине 80-х гг. Международный наземно-космический РСДБ-проект (VSOP-VLBI Space Observatory Programme) реализован в течение последних 7 лет. С помощью японского космического аппарата HALCA на орбиту с высотой 20000 км был выведен радиотелескоп диаметром 8 м, работающий в сантиметровом диапазоне волн. Полученные результаты доказали перспективность такого подхода. Сейчас готовится новый международный наземно-космический проект “Спектр-Р” (головная организация – Астрокосмический центр ФИАН). Аппарат “Радиоастрон” должен вывести радиотелескоп диаметром 10 м на орбиту высотой около 100000 км. Рассматривается апогей вплоть до орбиты Луны (400000 км). Рабочие диапазоны приемной системы 92, 18, 6, 1.35 см. Запуск запланирован на 2007 г. Антенна РТ-70 готовится как один из главных назем-

ных пунктов интерферометра. Обсуждаются проекты будущих космических миссий – вывод в космос радиотелескопа с диаметром 30 м (“ARISE”) и 12-метрового радиотелескопа миллиметровых волн (“Миллиметррон”). Без сомнения, наземно-космическая радиоинтерферометрия будет одним из генеральных направлений радиоастрономии нового века.

Среди наиболее перспективных крупных наземных радиоастрономических проектов ближайшего будущего укажем следующие.

В миллиметровом диапазоне волн планируется строительство системы апертурного синтеза ALMA (Atacama Large Millimeter Array). Система будет представлять собой 64 высокоточных зеркала диаметром 12 м, позволяющих работать на длинах волн, даже короче 1 мм. Она будет расположена на плато Атакама в Чили на высоте 5 км и будет введена в эксплуатацию в 2010 г.

Другой грандиозный проект обеспечит работу в сантиметровом–дециметровом диапазоне волн (частоты 200 МГц ÷ 22 ГГц). Это проект SKA (Square Kilometer Array), он уже готовится около 15 лет и обеспечит суммарную эффективную площадь решетки до 1 млн м². Есть несколько концепций реализации столь гигантской площади (решетка из антенных элементов, множество небольших зеркальных антенн, огромные чаши в карстовых впадинах и др.) Проект планируется завершить к 2012 г. В его реализации участвует много стран, и, возможно, будет построено несколько таких сооружений.

Особо следует сказать о международном проекте в области низкочастотной радиоастрономии LOFAR (LOw Frequency ARray). Решетка будет работать в диапазоне частот от 10 до 200 МГц и также будет иметь суммарную площадь, приближающуюся к 1 км². LOFAR имеет высокий приоритет и будет реализован первым из перечисленных проектов – в 2008 г. Возможно, что подобных низкочастотных систем на земном шаре будет несколько.

Перейдем к более детальному описанию возникновения и развития низкочастотной (декаметровый) радиоастрономии в Украине и в мире.

3. Декаметровая радиоастрономия в Украине

Как известно, радиоастрономия возникла именно в декаметровом диапазоне волн благодаря Карлу Янскому, открывшему космическое радиоизлучение вблизи частоты 15 МГц в начале 30-х гг. прошлого века. Однако дальнейший прогресс был связан, прежде всего, с освоением все более коротковолновых участков радиоспектра вплоть до сантиметровых и миллиметровых волн. Причина этого проста и очевидна – когда размер апертуры или базы интерферометра фиксирован, для получения максимального углового разрешения (это одна из главных задач наблюдательной астрономии) необходимо использовать наиболее короткие волны. До конца 50-х гг. инструменты декаметровых волн обладали ограниченными возможностями – имели низкое угловое разрешение, малые размеры, узкий рабочий диапазон и были неуправляемыми по обеим координатам. Несмотря на некоторые важные открытия, например, обнаружение Берком и Франклином ровно 50 лет назад спорадического радиоизлучения Юпитера, к тому времени декаметровый диапазон не был освоен в должной мере. Вместе с тем астрофизические исследования в этом диапазоне представляли большой интерес. На столь низких частотах большое количество физических и астрофизических процессов и объектов проявляется уникальным образом. Среди них можно отметить эффективное взаимодействие вещества с радиоизлучением (свободно-свободное поглощение в плазме, дисперсию, рассеяние, рефракцию); формирование синхротронного радиоизлучения, наиболее интенсивного на низких частотах; существенные вариации спектральных индексов излучения в силу ряда значимых причин; генерацию интенсивного импульсного и спорадического радиоизлучения при движении волн и пучков заряженных частиц в магнитоактивной плазме; когерентную эмиссию; тонкие атомные эффекты и многое другое. Можно утверждать, что низкочастотная (декаметровая) радиоастрономия способна давать уникальную информацию, недоступную в других астрономических диапазонах.

В конце 50-х гг. С. Я. Брауде (1911-2003) одним из первых осознал значимость и перспективы астрофизических наблюдений на предельно низких частотах ($10 \div 30$ МГц), которые возможно проводить с поверхности Земли. Среди тех, кто развивал низкочастотную радиоастрономию, следует также назвать Б. Эриксона (США), В. Радхакришнена (Индия), А. Буашо (Франция).

Однако в декаметровом диапазоне имеется множество мешающих факторов, значительно затрудняющих радиоастрономические наблюдения. К ним относятся многочисленные радиопомехи естественного и искусственного происхождения; среда распространения радиоволн, искажающая сигналы; высокая температура галактического фона, ограничивающая чувствительность. На рис. 5 приведены упомянутые мешающие факторы.

Более 40 лет назад в Институте радиофизики и электроники АН УССР (в 1985 г. на базе радиоастрономических отделов института был создан Радиоастрономический институт НАНУ) под руководством С. Я. Брауде и А. В. Меня были начаты работы по созданию радиоастрономических антенн декаметровых волн на новых принципах, позволяющих снизить влияние негативных факторов. Научные исследования и инженерно-технические разработки осуществлялись Л. Г. Содиным, Ю. М. Бруком, Н. К. Шарыкиным, Г. А. Инютиным, Н. Ю. Гончаровым, П. А. Мельяновским, Л. Л. Базеляном и другими сотрудниками. В результате в начале 70-х гг. был создан радиотелескоп УТР-2 [1, 2], который до настоящего времени является самым крупным и наиболее совершенным в мире инструментом (рис. 6, цветная вставка). Его отличительными особенностями являются: большие линейные размеры (2×1 км) и эффективная площадь (150000 м^2), высокая направленность (ширина диаграммы направленности около 0.5°), низкий уровень боковых лепестков и широкий диапазон частот ($8 \div 35$ МГц), многолучевость, электронное управление лучом в широком секторе по обеим координатам, большой динамический диапазон, помехоустойчивость, гибко изменяющаяся конфигурация, разви-

тая система контроля, устойчивость к внешним климатическим воздействиям, надежность работы, экологическая безопасность. На рис. 5 приведены основные методы борь-

бы с мешающими факторами декаметрового диапазона. Как видно, параметры и принципы построения радиотелескопа УТР-2 позволяют реализовать большинство из них.

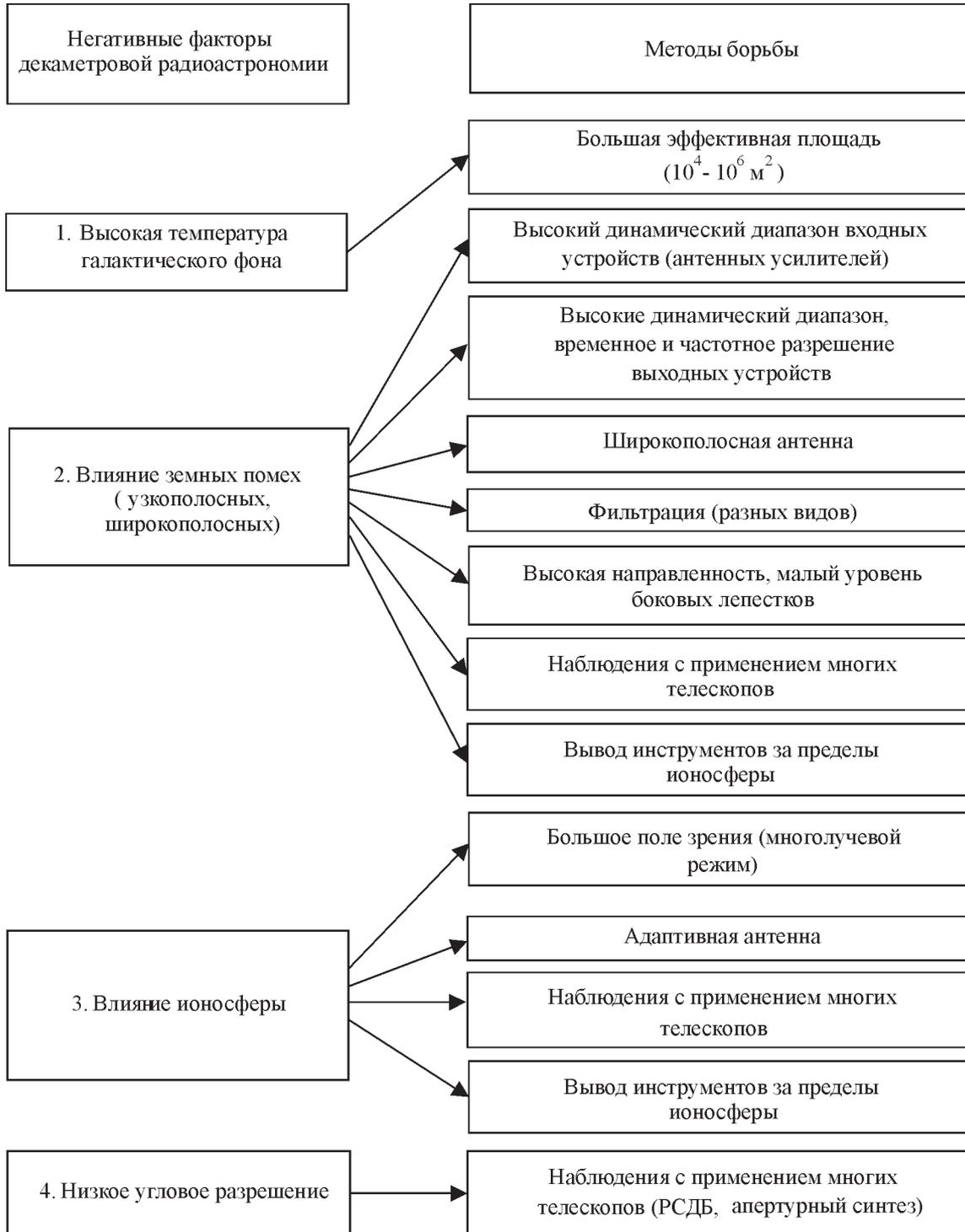


Рис. 5. Методы борьбы с мешающими факторами в декаметровой радиоастрономии

На основе радиотелескопа УТР-2 в 70-80-х гг. была создана уникальная система декаметровых интерферометров УРАН [3]. Кроме УТР-2, в нее входят еще 4 радиотелескопа меньших размеров (см. рис. 1). УРАН-1 и УРАН-4 принадлежат РИ НАНУ, УРАН-2 – Полтавской гравиметрической обсерватории НАНУ; УРАН-3 – Львовскому физико-механическому институту НАНУ. Система образует базы от 40 до 950 км, что дает угловое разрешение порядка 1 угловой секунды (это соответствует фундаментальному пределу, который обусловлен рассеянием в межзвездной среде). В настоящее время с помощью системы УРАН измеряются модуль функции видимости объектов и его зависимость от базы, частоты и часового угла. Это позволяет определять структуру радиоисточников на декаметровых волнах путем компьютерного моделирования и использования радиоизображений на более высоких частотах.

Основные параметры декаметровых радиотелескопов Украины представлены в табл. 1. Здесь же приведены параметры крупных низ-

кочастотных радиотелескопов NDA (Нанси, Франция) [4] и СУРА (Нижний Новгород, Россия) [5], которые используются в совместных с Украиной исследованиях.

В 70-х гг. под руководством Б. Эриксона был построен крупный радиотелескоп в Кларк Лэйке (США), соизмеримый по параметрам с УТР-2 [6]. К сожалению, в середине 80-х гг. этот радиотелескоп прекратил свое существование. На рис. 7 (цветная вставка) показано размещение крупнейших низкочастотных радиотелескопов в Европе.

Эффективность использования радиотелескопов во многом определяется выходной регистрирующей аппаратурой. За время существования радиотелескопа УТР-2 по мере развития электронной, цифровой и компьютерной техники сменилось несколько поколений регистрирующих устройств, а также появились новые средства, адекватные новым задачам. Показательным является повышение качества одного из типов применяемых устройств – цифровых коррелометров. Созданный около 30 лет назад цифровой коррело-

Таблица 1. Основные параметры радиотелескопов декаметровых волн

| Радиотелескопы | Расположение | Диапазон частот, МГц | Максимальная эффективная площадь, м ² | Количество элементарных излучателей, поляризация | Расстояние до УТР-2 (LOFAR), км | Синтезированное или РСДБ разрешение на 25 МГц |
|----------------|---------------------|----------------------|--|--|---------------------------------|---|
| УТР-2 | Харьков, Украина | 8 ÷ 32 | 150000 | 2040 1 линейная | 0 (~2000) | 25×25' |
| УРАН-1 | Змиев, Украина | 8 ÷ 32 | 5500 | 96 2 линейных | 42 (~1900) | 15" |
| УРАН-2 | Полтава, Украина | 8 ÷ 32 | 28000 | 512 2 линейных | 120 (~1800) | 5" |
| УРАН-3 | Львов, Украина | 8 ÷ 32 | 14000 | 256 2 линейных | 915 (~1000) | 1" |
| УРАН-4 | Одесса, Украина | 8 ÷ 32 | 7300 | 128 2 линейных | 613 (~1500) | 1.3" |
| NDA | Нанси, Франция | 8 ÷ 88 | 2×4000 | 2×72 2 круговых | 3000 (~500) | ~ 0.3" (потенциально) |
| СУРА | Н. Новгород, Россия | 4 ÷ 9 | 40000 | 144 2 линейных | 1500 | Передающая антенна, эффективная мощность ~150 МВт |

метр имел 32 канала, полосу анализа 150 кГц, объем памяти на канал 16 бит, сопряжение с перфоратором [7]. Коррелометр нового поколения [8, 9] имеет 4096 каналов, полосу 30 МГц, объем памяти на канал 32 бит и сопряжение с мощными ПК. Очевидный прогресс не требует комментариев.

В последние годы на радиотелескопе УТР-2, в частности, в рамках сотрудничества с Австрией и Францией активно внедряется регистрирующая аппаратура нового поколения. Параметры некоторых видов аппаратуры представлены в табл. 2. Эти параметры также позволяют реализовать методы борьбы с мешающими факторами (см. рис. 5). Применение того или иного вида оборудования определяется задачами исследований. Наиболее универсальными и эффективными являются цифровые спектральные процессоры (DSP) и устройства прямого анализа (WFR) [10]. В будущем с повышением быстродействия, объемов памяти (оперативной и долговременной) цифровой и компьютерной техники наиболее перспективным станет использование WFR. В настоящий момент их применение сдерживается быстрым заполнением памяти, проблемами архивации очень больших массивов первичных данных и их последующей обработки. Самую

высокую степень сжатия информации в процессе наблюдений обеспечивают DSP.

Помимо внедрения новой выходной аппаратуры, на радиотелескопе УТР-2 постоянно модернизировались и другие системы. В частности, новая система антенного усиления [11] обеспечила расширение диапазона частот, повышение чувствительности и помехоустойчивости (см. рис. 5).

Сочетание высокой эффективности радиотелескопа УТР-2 и новых регистрирующих средств позволило в последние годы провести большой объем исследований по различным программам, которые дали новые результаты [12-17]. Обнаружены новые виды и особенности декаметрового радиоизлучения астрофизических объектов. По сути, удалось увидеть “новые” Солнце, Юпитер, межпланетные мерцания, пульсары, источники континуума.

Таким образом, за более чем 30-летний период функционирования радиотелескопов УТР-2 и УРАН получен большой объем новой астрофизической информации. Результаты опубликованы в сотнях научных статей, а также в ряде обзоров [18-20]. Большинство объектов Вселенной от ближайших окрестностей Земли, Солнечной системы, нашей Галактики до самых удаленных радиогалак-

Таблица 2. Новое регистрирующее оборудование

| Оборудование | Диапазон частот, МГц | Полоса анализа, МГц | Число каналов | Частотное разрешение, кГц | Временное разрешение, мс | Число уровней квантования, бит |
|---------------------------------------|----------------------|---------------------|---------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Цифровой спектральный процессор (DSP) | 5 ÷ 70 | 12.5 | 1024 | 12 | 1 | 12 |
| DSP II (ROBIN II), в разработке | 5 ÷ 70 | 14 | 2048 | 0.4 ÷ 7 | 0.5 | 14 |
| Устройство прямой регистрации (WFR) | 5 ÷ 70 | 12.5 | неограничено | неограничено | неограничено | 12 |
| Фильтровой анализатор (FB) | 8 ÷ 32 | 1 ÷ 20 | 60 | 0.3 ÷ 10 | 3 | 14 |
| Цифровой автокоррелометр | 8 ÷ 32 | 1 ÷ 30 | 4095 | 0.1 ÷ 10 | 100 | 2 |

тик и квазаров оказались доступными для исследований. Доказана высокая информативность декаметрового радиоастрономии. Стали возможны прецизионные измерения варьирующихся в широких пределах энергетических, пространственных, спектральных, временных, поляризационных характеристик космического радиоизлучения, несущих информацию и о процессах в масштабах Вселенной, и о тонких атомных эффектах.

Перечень объектов и задач, которые исследуются и решаются с помощью радиотелескопов УТР-2 и УРАН, представлен на рис. 8. Знаком “+” отмечены те направления, где получено большое количество положительных результатов для представительной выборки (от десятков до тысяч) объектов, знак “~” показывает единичные случаи полученных данных или их предварительный характер, знак “-” иллюстрирует отсутствие пока положительных результатов. Знаком “*” отмечены те объекты, для которых реализуемая чувствительность не ограничивается эффектом спутывания и в зависимости от характера сигналов может достигать единиц мЯн (см. раздел 4).

Исследования, относящиеся к ближнему космосу, солнечной системе и Галактике, отмечены штриховой линией. В последние годы эти низкочастотные исследования часто выделяются как отдельное направление, связанное с общими проблемами звездной и планетной физики, поиска планет, происхождения жизни, звездно-планетных (солнечно-земных) связей, космической погоды.

Перечислим некоторые основные результаты, полученные с помощью радиотелескопов УТР-2 и УРАН за последние 30 лет.

Аппаратно-методические разработки и исследования

– Разработаны, созданы и всесторонне апробированы крупнейшие в мире широкополосные электрически управляемые радиоастрономические антенны-решетки и интерферометры декаметрового диапазона волн (УТР-2, УРАН-1, УРАН-2, УРАН-3, УРАН-4).

– Разработаны новые принципы определения и эталонирования параметров антенн-решеток и поиска оптимальных configura-

ций многоэлементных антенн и интерферометров, методы контроля антенн и борьбы с мешающими факторами в низкочастотной радиоастрономии.

– Доказана эффективность применения активных антенных элементов в низкочастотной радиоастрономии путем создания первой активной 30-элементной решетки – возможного прототипа будущих гигантских низкочастотных радиотелескопов нового поколения.

– Разработаны и внедрены ряд поколений прогрессивно улучшающихся приемно-усилительно-преобразовательных устройств, элементов антенной техники, средств регистрации радиоастрономических данных, а также методы исследований, обеспечившие повышение помехоустойчивости, информативности и эффективности наблюдений и высокоточное определение энергетических, пространственных, временных, спектральных, поляризационных характеристик космического радиоизлучения декаметровых волн.

Солнечная система

– Обнаружены новые особенности (включая неизвестные ранее тонкие частотно-временные структуры) и виды спорадического радиоизлучения Солнца – всплески III, II, IV типов; дрейфующие пары; спайки; S-, V-, J-всплески, – которые дают новую информацию о солнечной короне и новый подход к решению проблем солнечно-земных связей.

– Для изучения солнечного ветра обоснованы и реализованы методы межпланетных мерцаний и рассеяния радиоизлучения далеких компактных радиоисточников, которые на декаметровых волнах дают уникальную возможность диагностики турбулентной плазмы на больших элонгациях (вплоть до орбиты Земли и далее) и оказываются чувствительными к неоднородным и нестационарным явлениям в межпланетной среде.

– Благодаря наилучшему сочетанию чувствительности, полосы анализа, частотного и временного разрешений украинских инструментов, обнаружены новые особенности декаметрового спорадического радиоизлучения Юпитера различных частотно-временных масштабов.

| | | |
|-------------------------------------|---|-----------|
| Земля | * Ионосфера | + |
| | * Магнитосфера | ~ |
| | * Атмосферные ливни космических лучей (NDA) | + |
| | * Параметры поверхности | + |
| Солнечная система | * Солнце: спокойное | + |
| | активное | + |
| | радар (УТР-2 + СУРА) | - |
| | * Юпитер | + |
| | * Планеты (Сатурн) | - |
| | * Межпланетная среда: мерцания | + |
| | РСДБ | + |
| | Рек. линии | ~ |
| | * Луна: покрытия | + |
| | радар (УТР-2 + СУРА) | + |
| вторичная эмиссия космических лучей | - | |
| Галактика | Кометы | ~ |
| | * Пульсары | + |
| | * Активные звезды | ~ |
| | * Экзопланеты | - |
| | * Транзиенты | - |
| | Нетепловой фон | + |
| | Остатки сверхновых | + |
| | Области НП | + |
| | * Межзвездная среда (рек. линии) | + |
| | Метагалактика (полный обзор неба - УТР-2; избранная РСДБ - УРАН) | Галактики |
| Радиогалактики | | + |
| Квазары | | + |
| Скопления галактик | | + |
| Неидентифицированные объекты | | + |
| * Транзиенты | | - |

Рис. 8. Объекты, исследуемые с помощью радиотелескопов УТР-2 и УРАН

Галактика

– Построены карты нетеплового фонового радиоизлучения Галактики в диапазоне 10 ÷ 25 МГц с наивысшими для декаметрового диапазона чувствительностью

и разрешающей способностью, что позволяет изучать распределение и происхождение электронной компоненты космических лучей, галактических структур и их эволюцию.

– Изучены пространственная и спектральная структуры галактических остатков сверхновых (ОСН) (более 10), обнаружены деформация низкочастотных участков спектров (распределение релятивистских электронов в ОСН и ионизированной материи в Галактике) и эффекты их взаимодействия с окружающей межзвездной средой (реликтовые зоны Н II, энергетика и эволюция ОСН и межзвездной среды).

– Обнаружено и изучено поглощение фонового радиоизлучения в более чем 10 протяженных эмиссионных туманностях (областях Н II), благодаря чему определены их угловая структура, параметры (электронные температура и плотность, мера эмиссии, размеры), радиальное распределение электронной температуры (уменьшается при удалении от центра), а также проиллюстрирована возможность “применения” областей Н II в качестве зондов для определения объемной плотности (томографии низкочастотного нетеплового галактического радиоизлучения) и для оценки уровня метагалактического фона.

– Обнаружено импульсное (в некоторых случаях – континуальное) декаметровое радиоизлучение ряда пульсаров, в том числе индивидуальные импульсы со значительной вариацией по интенсивности (вплоть до гигантских импульсов), форме и положению на временной шкале, что определяется особыми условиями во внешней магнитосфере пульсаров, где генерируется низкочастотное радиоизлучение.

– Обнаружено и всесторонне изучено новое астрофизическое явление – низкочастотные рекомбинационные радиолнии поглощения атомов углерода в межзвездной среде. Зарегистрированы рекордно высокие состояния ридберговских атомов вплоть до главных квантовых чисел порядка 1000. Доказана эффективность использования этого явления для диагностики холодной разреженной космической плазмы и возможность получения с его помощью информации, недоступной другим методам астрофизических исследований.

– Реализована постоянно действующая программа поисковых исследований в декаметровом диапазоне с целью обнаруже-

ния астрофизически важных экзотических и транзиентных явлений и объектов. Положительные результаты уже получены, в частности, в следующих направлениях: рекомбинационные радиолнии и квантовые переходы на уровнях порядка 1000 (боровский диаметр атома порядка 0.1 мм); декаметровое радиоизлучение пульсаров, включая индивидуальные и гигантские импульсы; спорадическое радиоизлучение вспыхивающей звезды; поглощение фонового радиоизлучения в плазме хвоста кометы Когоутека. Ряд результатов находится в состоянии анализа.

Метагалактика

– Составлен наиболее полный в декаметровом диапазоне волн каталог радиоисточников северного неба (около 4000 объектов).

– Анализ статистически полного обзора внегалактических радиоисточников (включая радиогалактики и квазары с самыми большими красными смещениями) позволил определить и классифицировать их спектр, выявить значительные вариации низкочастотных спектральных индексов, отождествить каталогизированные объекты, обнаружить новые источники, ненаблюдаемые на высоких частотах из-за больших значений спектральных индексов (> 3).

– Статистический анализ каталога позволил обнаружить явление уменьшения пространственной плотности далеких радиоисточников, отражающее эпоху их формирования. Данный эффект космологической эволюции наиболее ярко проявляется на самых низких радиочастотах.

– Обнаружены ненаблюдаемые на высоких частотах крупномасштабные радиогало в ближайшей галактике (туманность Андромеды) и в ряде далеких скоплений галактик.

– Измерения на радиоинтерферометрической системе УРАН позволили получить уникальные данные с рекордным (секундным) угловым разрешением пространственной структуры нескольких десятков радиогалактик и квазаров. Практически во всех случаях обнаружены существенные отличия (прежде всего значительные уширения) компонентов структуры на низких частотах от радиоизображений на более высоких частотах. Это от-

ражает основополагающие процессы в далеких объектах (высвечивание релятивистских электронов, их диффузию, взаимодействие с окружающей межгалактической средой) и является ценным источником информации для изучения космологических явлений, исследований Вселенной на больших красных смещениях и крупномасштабных структур.

Результаты, полученные в области декаметрового радиоастрономии, прежде всего, с помощью украинских телескопов, стимулируют ее прогресс во всем мире, включая создание новых гигантских наземных низкочастотных радиотелескопов и инструментов космического базирования.

4. Проекты новых низкочастотных радиоастрономических систем LOFAR, LWA

Необходимость создания новых гигантских наземных низкочастотных радиотелескопов уже достаточно давно осознана в радиоастрономическом мире, в том числе в Украине. Некоторые предложения обсуждались в ряде научных публикаций, на конференциях и симпозиумах [21-26]. Около 15 лет назад эти идеи в некоторой степени конкурировали с проектами размещения низкочастотных инструментов в космическом пространстве (см. раздел 6) для исключения мешающих факторов в диапазоне предельно низких частот (см. рис. 6).

Однако у космических проектов есть ряд проблем и ограничений, связанных с экономичностью, надежностью, временем жизни инструментов и, главное, с астрофизическими ограничениями. Возможность реализации в космосе радиотелескопов с гигантской эффективной площадью (до нескольких квадратных километров) в обозримом будущем сомнительна. Существующие проекты предполагают эффективную площадь не более тысяч квадратных метров. Если применить длительное и широкополосное интегрирование и идеологию апертурного синтеза с переменной базой, в принципе, такой площади будет достаточно для качественного картографирования компактных стационарных радиоисточников континуума. Од-

нако из-за низкого фактора заполнения апертуры и малой “мгновенной” эффективной площади огромное количество астрофизических объектов и явлений, быстропеременных и узкополосных процессов (особенно, низкоконтрастных), которыми насыщен декаметровый диапазон (см. раздел 3), будет недоступно для наблюдений. Согласно теоретическим оценкам и имеющемуся мировому опыту, полученному, прежде всего, на УТР-2 и УРАН, для решения новых задач, проведения поисковых программ и исследований на новом количественном и качественном уровнях требуется эффективная площадь не менее 1 млн. м², т. е. значительно большая, чем у существующих радиотелескопов. Это не исключает в будущем вывода низкочастотных инструментов в космическое пространство, но в настоящее время наиболее актуально создание гигантских наземных радиотелескопов.

Реализация этой идеи уже начата (см. раздел 2). В Голландии (ASTRON) и США (NRL, MIT, NRAO) образован совместный консорциум по созданию гигантских низкочастотных радиоастрономических систем нового поколения – уже упоминавшаяся LOFAR в Голландии и LWA (Long Wavelength Array) в США [27, 28]. Будут построены (работы уже начаты) многоэлементные радиотелескопы апертурного синтеза, перекрывающие диапазон 10 ÷ 240 МГц, имеющие суммарную эффективную площадь до 1 км² и максимальную базу до 400 км. Это обеспечит чувствительность около единиц мЯн при разрешающей способности порядка единиц угловых секунд, что даст возможность получить новые знания о Вселенной, о ее радиоизлучении в диапазоне декаметровых–метровых волн.

При создании систем будут максимально использованы самые последние достижения электронной, компьютерной техники, информационных технологий (см. раздел 2), включая даже оцифровку сигналов на уровне отдельных диполей.

Научная программа и цели будущих низкочастотных исследований уже достаточно хорошо определены и обоснованы усилиями многих специалистов – радиоастрономов и астрофизиков, включая представите-

лей Украины. Эти задачи формулировались во многих публикациях и обсуждались на многочисленных представительных конференциях, в числе последних: “Radio Astronomy at Long Wavelengths”, AGU Chapman Conference, Paris, September 1998; “The Universe at low frequencies”, IAU Symposium 199, Pune, India, November 1999; “The Low Frequency Array (LOFAR) and (Extra-) Solar System Science”, Special Session of AGU-EGS-EGU General Assambly, Nice, France, April 2003; “Planetary and Solar Radioemission”, International Workshop 6, Graz, Austria, April 2005.

Обобщенный список будущих научных направлений и задач выглядит следующим образом.

1. Солнечная система.

1.1. Солнце (активное, спокойное).

1.2. Обнаружение и сопровождение выбросов корональных масс (СМЕ) – пассивное, радиолокационное.

1.3. Межпланетная среда, ударные волны (мерцания, рассеяние излучения компактных источников).

1.4. Солнечно-земные связи, космическая погода.

1.5. Юпитер.

1.6. Другие планеты (Сатурн, SED – Saturn Electrostatic Discharges).

1.7. Луна (метод покрытий, локация, изучение турбулентной плазмы ближнего космоса, зондирование; поиск вторичной эмиссии космических лучей высоких энергий).

1.8. Ионосфера, магнитосфера (пассивные, активные методы).

1.9. Атмосферные ливни космических лучей с энергией $\sim 10^{21}$ эВ.

2. Галактика.

2.1. ОСН.

2.1.1. Картографирование и томография космических лучей ($\sim 10^{15}$ эВ) для изучения их распределения, спектров, происхождения.

2.1.2. Спектральные исследования ОСН для проверки теории ускорения ударных волн, эволюции ОСН, их взаимодействия с окружающей средой.

2.1.3. ОСН и распределение ионизованного газа в межзвездной среде.

2.1.4. Распределение галактических ОСН с расстоянием.

2.2. Области ионизованного водорода Н II, использование их как зондов для томографии объемной плотности нетеплового излучения.

2.3. Межзвездная среда.

2.3.1. Рекомбинационные радиолнии углерода.

2.3.2. Спектральные линии других типов.

2.3.3. Распространение, рассеяние и поглощение радиоволн в межзвездной среде; межзвездные мерцания.

2.4. Пульсары.

2.5. Нейтронные звезды и их окружение.

2.6. Двойные рентгеновские источники.

2.7. Экзопланеты.

2.8. Активные звезды.

2.9. Транзиентные явления.

2.9.1. Гигантские импульсы пульсаров.

2.9.2. Когерентная всплесковая эмиссия от экзопланет и активных звезд.

2.9.3. Радиопослесвечение в магнетарах.

2.9.4. Радиопослесвечение гамма-всплесков.

2.9.5. Быстрая эмиссия от ОСН и источников гамма-всплесков.

2.9.6. Микроквасары.

2.9.7. Вторичная эмиссия разных типов космических лучей высоких энергий.

3. Метагалактика.

3.1. Вселенная с большими красными смещениями.

3.1.1. Полные обзоры неба.

3.1.2. Радиогалактики с большими красными смещениями.

3.1.3. Галактики активного звездообразования.

3.1.4. Радиоисточники с крутыми спектрами как реликтовые объекты Вселенной.

3.1.5. Обнаружение и изучение первых супермассивных черных дыр.

3.2. Эпоха реионизации.

3.2.1. Поиск областей поглощения Н I.

3.2.2. Обнаружение пространственной и спектральной структуры.

3.3. Эволюция крупномасштабной структуры.

3.3.1. Радиогалактики при $z > 1$ мегапарсековых масштабов.

3.3.2. Радиогало.

3.3.3. Томпсоновское рассеяние скоплениями газа и межгалактическая среда.

3.3.4. Реликтовая Вселенная; жизненный цикл радиогалактик, активных ядер; структуры джетов; формирование скоплений.

3.3.5. Скопления сливающихся галактик и особенности крупномасштабной структуры, идентифицируемые с диффузной синхротронной эмиссией.

3.3.6. Изучение эмиссии скоплений для поиска темной материи сливающихся систем.

3.3.7. Изучение процессов самопоглощения, распределения низкоэнергичных электронов, магнитных полей, сливающихся ударных волн в радиогалактиках и в скоплениях с энергиями релятивистских частиц до 10^{19} эВ.

3.4. Тепловое и нетепловое излучение в ближайших галактиках.

3.5. Компактные радиоисточники в ближайших галактиках.

3.6. Рассеяние в межгалактической среде.

4. Активная и транзиентная Вселенная.

4.1. Полные долговременные обзоры неба для детектирования спорадических эффектов.

4.2. Физика коллапса и взрыва.

Интересно отметить, что перечень объектов исследований на УТР-2 и УРАН (см. рис. 8) перекрывает основную часть приведенного списка, представленного в более развернутом виде, т. е. с указанием не только объектов (участков небесной сферы), на которые будет направляться радиотелескоп для определения энергетических, пространственных, спектральных, временных, поляризационных характеристик их радиоизлучения, но и некоторых физических проблем, которые будут решаться в результате интерпретации наблюдений.

5. Применение крупнейших в мире декаметровых радиотелескопов для аэробации и развития концепции LOFAR

Представляет интерес сравнение основных параметров существующих систем и будущих гигантских радиотелескопов (табл. 3). В первую очередь, новые системы будут отличаться существенно большим количеством стан-

ций. Это значительно улучшит качество картографирования. Заметно расширится диапазон частот, увеличится количество элементов в антенне и, соответственно, ее эффективная площадь. В работах [27, 28] в результате сравнения параметров существующих и будущих инструментов сделан вывод о повышении чувствительности и разрешающей способности последних на 2-3 порядка. Необходимо уточнить эти данные. В частности, не упоминается реально работающая РСДБ-система УРАН, состоящая из 5 станций с размерами, не уступающими размерам станций LOFAR и LWA, и имеющая максимальную базу 950 км. Полноценное картографирование (измерения фазы) на частотах менее 30 МГц представляется проблематичным из-за влияния ионосферы и помех. Тем не менее система УРАН дает ценную информацию о структуре источников путем измерения модулей функции видимости и компьютерного моделирования. При этом угловое разрешение достигает единиц секунд, что подтверждено экспериментально. Приводимая весьма высокая флуктуационная чувствительность УТР-2 (~5 Ян) реализуется для полосы всего лишь в 10 кГц и малой постоянной времени (60 с) благодаря большой эффективной площади. При наблюдениях радиоисточников континуума реальная чувствительность радиотелескопа ограничивается не этой величиной, а эффектом спутывания. При ширине диаграммы направленности УТР-2 25 угловых минут на частоте 25 МГц и известном (примерно) пространственном распределении источников во Вселенной величина этого эффекта составляет ~5 Ян. Очевидно, что при измерениях на системе УРАН степень спутывания будет ниже (вероятно, менее 1 Ян), и ее предстоит определить расчетным путем и экспериментально. В случае наблюдений на УТР-2 также назрела необходимость пересмотра влияния эффекта спутывания (вероятно, он окажется заметно ниже) в связи с новыми данными о пространственном распределении источников, совершенствовании средств и методов регистрации. Вместе с тем, есть множество объектов и явлений (см. рис. 8), наблюдения которых не огра-

Таблица 3. Сравнение параметров существующих и будущих низкочастотных инструментов

| Параметр | УТР-2, УРАН | LOFAR, LWA |
|---|------------------------|------------------------------------|
| Диапазон частот, МГц | 8 ÷ 32 | 10 ÷ 240 (20 ÷ 80) |
| Число станций | 6 | 100 (50) |
| Полное число элементов | ~3000 | ~13000 |
| Полное число элементов на одну поляризацию | ~4000 | ~26000 |
| Число элементов на станцию | 96...1440 | 128 (256) |
| Размер станции | 28×240 м...60×1900 м | ~ 100×100 м |
| Максимальная база, км | 950 | ~400 |
| Минимальная база, км | 0.5 | ~1 |
| Максимальное угловое разрешение | ~ 1" | ~ 3" |
| Поле зрения | 2...20° | вся полусфера |
| Электронное управление | есть (±80°) | есть (многолучевость на полусфере) |
| Поляризация | 2 линейные (4 станции) | 2 линейные |
| Максимальная наблюдаемая полоса, МГц | 10...20 | 32 |
| Спектральное разрешение, кГц | 0.1...12 | <1 |
| Временное разрешение, мс | 1...100 | 1 |
| Максимальная суммарная эффективная площадь (25 МГц), м ² | ~200000 | 350000...900000 |
| Предел чувствительности по эффекту спутывания для точечного источника континуума (25 МГц), мЯн | ≤1000 | ≤1 |
| Чувствительность для радиоизлучения без эффекта спутывания (25 МГц, $\tau = 1$ ч, $B = 4$ МГц), мЯн | ~10 | ~1.5 |

ничиваются эффектом спутывания. В этом случае полоса анализа и/или время интегрирования могут быть значительно увеличены (большая диапазонность и возможность длительного сопровождения радиоисточника позволяют сделать это на УТР-2), т. е. могут быть, например, такими же, как при оценке чувствительности LOFAR и LWA: $B = 4$ МГц, $\tau = 1$ ч. В этом случае отличие в чувствительности будет определяться только разницей в эффективных площадях или даже разницей в количестве отдельных излучателей. Как видно из табл. 3, это отличие составляет 4-5 раз для одной поляризации и достигает 6-7 раз в случае использования обеих поляризаций LOFAR и LWA. Подчеркнем еще раз, что такое сравнение справедливо только для исследований тех

объектов, где эффект спутывания отсутствует. Примерами таких объектов являются, в частности, пульсары и межзвездные рекомбинационные линии. В реальных экспериментах на УТР-2 были реализованы параметры $\tau = 8$ ч, $B = 12$ МГц (пульсары) и $\tau = 5000$ час, $B = 1$ кГц (линии), что обеспечило чувствительность в несколько мЯн. В задачах картографирования радиоисточников континуума на частотах менее 30 МГц чувствительность новых инструментов будет, вероятно, в 100 раз превышать чувствительность УТР-2 и УРАН. Реализация потенциальной чувствительности на этих частотах затруднена также влиянием земных помех и ионосферы.

Таким образом, LOFAR и LWA по всем параметрам (в разной степени) превосходят

существующие системы и их создание актуально, обоснованно и своевременно. Особо следует отметить новую идеологию и новую наблюдательную парадигму будущих телескопов: развитое “software” и практически всенаправленный многолучевой одновременный мониторинг.

Вместе с тем существующие системы еще не исчерпали своих возможностей. Радиотелескопы УТР-2, УРАН и другие низкочастотные телескопы, а также исследования на них являются хорошим “прекурсором” будущих инструментов и исследований. Организации, создающие новые инструменты, не имеют экспериментальной базы и возможностей работы в низкочастотном диапазоне, за исключением системы VLA, работающей на частоте 74 МГц. Это затрудняет текущую проверку специфических для длинноволновой радиоастрономии астрофизических, методических, технических идей и подходов, необходимых для разработки и применения будущих гигантских радиотелескопов нового поколения. Кроме того, при реализации столь важных, сложных и дорогих проектов необходимо максимально использовать существующий мировой опыт и достижения в астрофизических исследованиях, аппаратных и методических разработках. В этой связи в РИ НАНУ создана концепция применения крупнейших в мире радиотелескопов для уточнения и совершенствования научной программы будущих исследований, улучшения методов наблюдений, направленных, прежде всего, на снижение влияния помех и ионосферы, оптимизации технических характеристик и принципов построения регистрирующих средств и новых радиотелескопов [13, 29]. Эта деятельность одобрена радиоастрономическим сообществом и поддержана грантом INTAS – 03-5727 “Применение крупнейших в мире декаметровых радиотелескопов для апробации и развития концепции LOFAR” (Украина – Франция – Австрия – Россия).

Вместе с тем роль Украины в перспективном развитии низкочастотной радиоастрономии не ограничивается только этим подходом. Имеется весьма актуальная и реальная возможность создания в Украине еще одного гигантского низкочастотного радио-

телескопа нового поколения. Основания для этого очевидны:

- актуальность стоящих астрофизических задач и возможность их решения только с помощью гигантских инструментов;

- экономическая и научно-техническая целесообразность обеспечения самой большой эффективной площади именно на низких частотах;

- современные технические средства и достижения наиболее просто и естественно внедряются в низкочастотную радиоастрономию;

- необходимость создания ряда гигантских радиотелескопов различающейся конфигурации в разных точках земного шара (США, Голландия – создается; Австралия – будет создаваться; Украина – ?);

- высшие в мире потенциал и приоритет украинской декаметровой радиоастрономии;

- интерес и поддержка мировой радиоастрономической общественности и тесное международное сотрудничество;

- новые разработки и “ноу-хау” украинских радиоастрономов;

- наличие площади для размещения инструментов;

- умеренный объем требуемого финансирования;

- создание низкочастотного телескопа является наукоемкой, а не технологически емкой задачей, что подходит для Украины уже сейчас;

- полное отсутствие научного, технического, финансового и экологического риска;

- возможность иметь и прямым образом использовать собственную уникальную экспериментальную физическую установку (“интернет-наука” не есть оптимальный путь для развитой цивилизованной державы);

- сохранение и развитие лидирующей роли Украины в данной области физической науки.

Предложения РИ НАНУ по созданию новой низкочастотной радиоастрономической системы поддержаны постановлением Президиума НАН Украины от 26.12.2000, открывшего первый этап работ и соответствующее финансирование. В настоящее время экономические проблемы сдерживают развитие работ.

При большом количестве элементов новых инструментов (до 20000) общая стоимость будет определяться стоимостью отдельного антенного элемента в решетке. В настоящее время представляется перспективной идея применить активный (со встроенным усилителем) антенный элемент малой

длины. Рис. 9 иллюстрирует возможность более простой реализации большой эффективной площади антенны-решетки на самых длинных волнах (количество элементов $N \sim 1/\lambda^2$), а также электродинамический “парадокс” – короткий излучатель (диполь Герца) собирает электромагнитную энергию

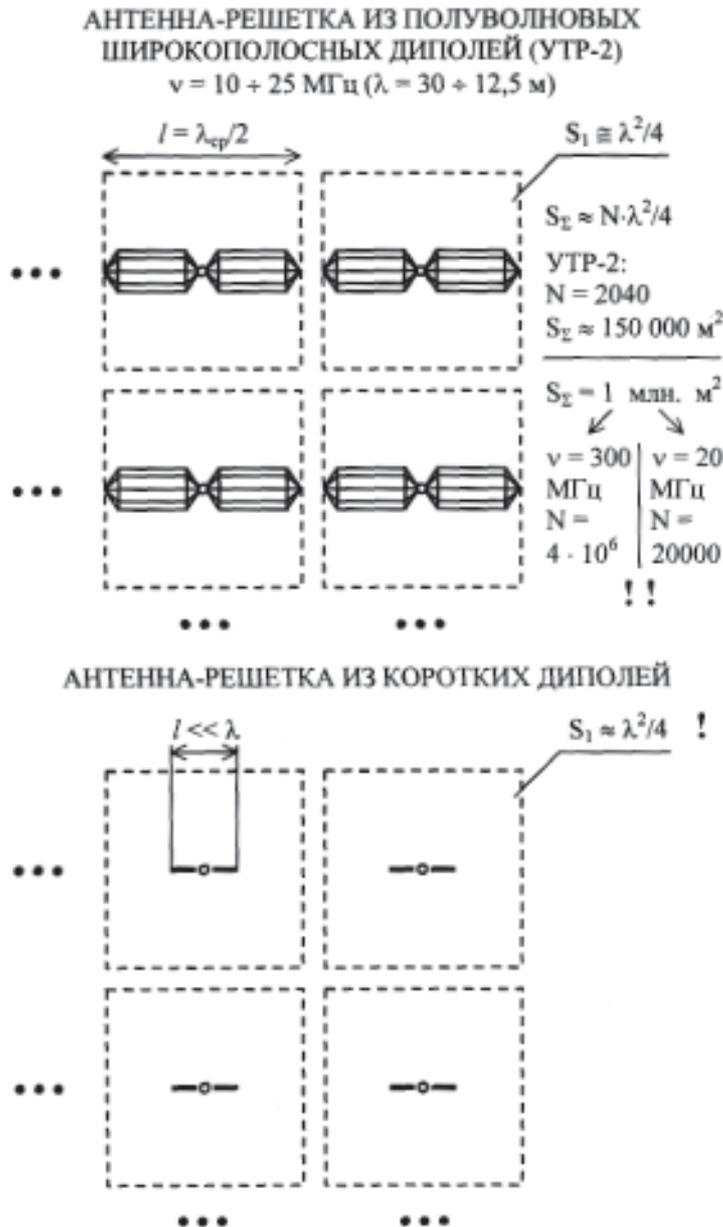


Рис. 9. Антенны-решетки из полуволновых и коротких диполей

примерно с той же площади, что и полуволновый диполь. Подобные антенны широко используются в мобильных телефонах, автомобильных приемниках и т. п., однако из-за низкой чувствительности они пока не нашли применения в радиоастрономии. В РИ НАНУ разработан эффективный вариант такого элемента, отличающийся высокой чувствительностью, широким диапазоном частот (10 ÷ 80 МГц), помехоустойчивостью, дешевизной (менее 50 грн.).

Для более детального изучения такого подхода на обсерватории УТР-2 создана 30-элементная антенна-решетка из активных элементов [30, 31] – первая активная антенна в радиоастрономии (рис. 10, цвет-

ная вставка). Кроме того, реализована еще одна уникальная возможность – для определения параметров решетки и антенного элемента проведено сравнение с решеткой точно такой же конфигурации, “вырезанной” из радиотелескопа УТР-2 и состоящей из идеальных широкополосных (но весьма дорогих) полуволновых диполей. Ни в одном другом учреждении мира такое наиболее объективное исследование провести невозможно. Испытания показали, что новое научно-техническое решение по чувствительности не уступает старому, а по всем остальным параметрам значительно его превосходит. Это иллюстрирует, в частности, рис. 11, на котором приведены динамические спектры спо-

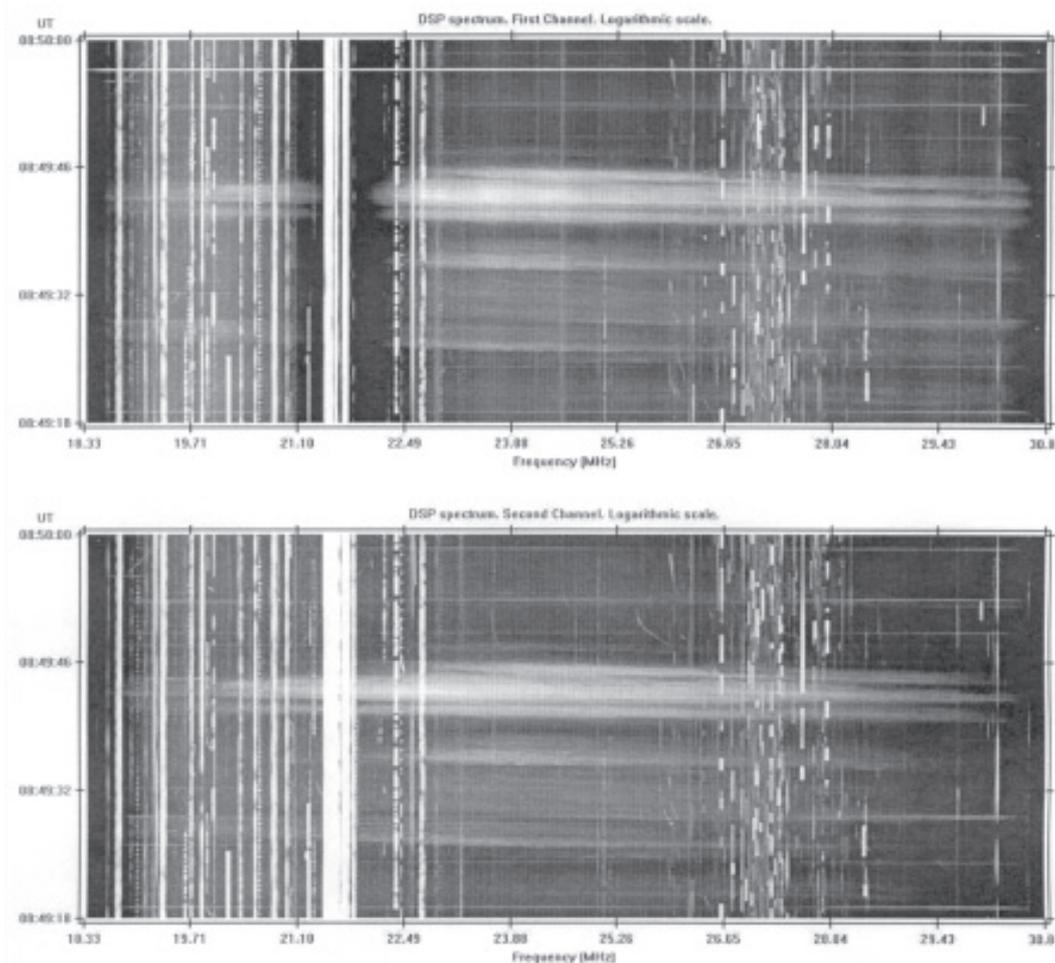


Рис. 11. Динамические спектры спорадического радиоизлучения Солнца, полученные на новой решетке (вверху) и на 30-элементной части радиотелескопа УТР-2 (внизу)

радиического радиоизлучения Солнца в диапазоне $18 \div 30$ МГц, полученные одновременно на новой 30-элементной решетке и на аналогичном по размерам и конфигурации старом образце.

Одной из задач проекта LOFAR является радиолокация солнечной короны и СМЕ, что важно для изучения солнечно-земных связей и космической погоды [32]. Эта идея обсуждается также в проекте LOIS (LOFAR outtrigger in Scandinavia) [33]. Пробные эксперименты на низких частотах для локации Солнца и Луны (см. рис. 8) были проведены в бистатическом режиме СУРА–УТР-2. Из-за низкой частоты излучения системы СУРА (максимум 9 МГц) эксперименты были успешными только для Луны [31]. Отметим, что, используя сравнительно скромные средства, любую из приемных антенн УРАН можно инвертировать в передающую (обратно). При уровне парциальной мощности всего 1 кВт на элемент суммарная мощность составит $0.2 \div 1$ МВт. Такого уровня сигнала в непрерывном режиме пока нигде реализовано не было. Указанная модернизация позволит провести уникальные радиолокационные эксперименты уже сейчас на имеющихся низкочастотных радиотелескопах и, что особенно интересно, с будущей системой LOFAR.

На основе описанных принципов представляется целесообразным создание в первую очередь большой сосредоточенной приемной решетки размером несколько километров и эффективной площадью 1 млн м². В LOFAR и LWA не предполагается столь большое компактное “ядро”. С его помощью возможно более эффективное, чем ранее и чем в LOFAR и LWA, решение большого количества актуальных астрофизических задач (см. рис. 8, пункты отмеченные “*”). На рис. 12 показано возможное (случайное) размещение 100 субрешеток размером 100×100 м каждая на обсерватории УТР-2. Этот рисунок не является окончательным вариантом построения новой антенны, он лишь иллюстрирует возможность размещения инструмента суммарной площадью 1 км² (и даже более) на территории обсерватории. Украина обладает вы-

соким потенциалом в области разработки оптимальных конфигураций антенн и интерферометров [34], который может быть использован при создании новых радиотелескопов. Описанные принципы могут быть применены также для увеличения площадей всех антенн УРАН и строительства дополнительных дешевых антенн среднего размера ($\sim 100 \times 100$ м) на территории Украины. В принципе такая система по параметрам и возможностям будет превосходить строящиеся LOFAR и LWA.

6. Низкочастотная радиоастрономия космического базирования

Есть несколько убедительных мотивов в пользу вывода астрономических инструментов (телескопов различных диапазонов волн, разнообразных датчиков) в космическое пространство. (Внеатмосферная астрономия всегда была одной из основных задач космической деятельности.) Во-первых, это необходимость приблизиться к объекту исследований и реализация возможности проведения измерений in-situ. За время космической эры было множество подобных миссий. В настоящее время, в частности, успешно реализуются проекты “Mars-Express”, “Cassini-Huygens”, “Rozetta”. Очевидно, что этот подход осуществим только для объектов солнечной системы: Солнца, планет, комет, астероидов, межпланетной среды. Вторая цель – уход от негативного влияния атмосферы Земли. Как известно, атмосфера искажает наблюдения в большей части электромагнитного спектра – от субмиллиметровых волн до гамма-диапазона, а в большинстве случаев делает наземные наблюдения (даже высокогорные, самолетные и аэростатные) вообще невозможными. Примерами внеатмосферных астрономических проектов являются HST (Hubble Space Telescope) в оптическом и GRO (Gamma Ray Observatory) в гамма-диапазоне. Высокочастотная радиоастрономия открыла еще одну возможность использования космического пространства. Это наземно-космическая радиоинтерферометрия, когда необходимо реали-

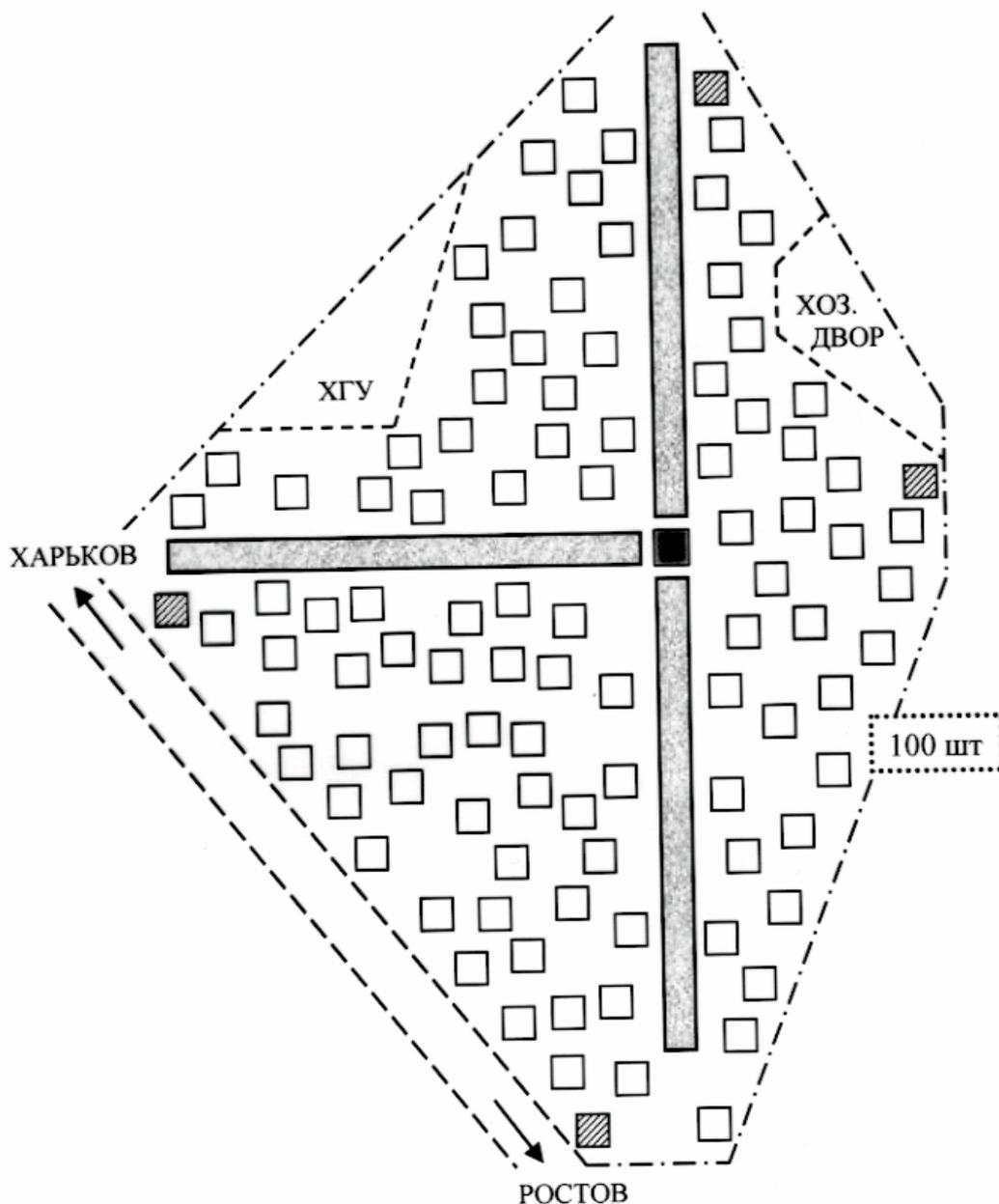


Рис. 12. План возможного размещения низкочастотной антенны площадью 1 млн м² на территории УТР-2

зовать базу, большую диаметра Земли, и получить наивысшее угловое разрешение (см. раздел 2). Уже осуществлен проект VSOP, готовятся новые впечатляющие проекты. Наконец, особая ситуация складывается в радиоастрономии предельно низких частот – в декаметровом-гектометровом диапазоне волн. На частотах 10 ÷ 30 МГц на-

земные наблюдения затруднены, а на частотах менее 8 ÷ 10 МГц вообще невозможны из-за экранирующего влияния ионосферы Земли. Кроме того, в отличие от других участков электромагнитного спектра, в этих диапазонах имеют место дополнительные мешающие факторы – многочисленные земные помехи разных типов искусственного

и естественного происхождений. Поэтому вывод низкочастотных астрономических инструментов за пределы атмосферы (точнее, ионосферы) Земли особенно актуален (см. рис. 6).

Подобные проекты (LFSA, ALFA, SIRA) обсуждаются уже достаточно давно [35, 36]. Их идея заключается в запуске определенного количества микроспутников (от единиц до десятков), на каждом из которых будет установлена элементарная широкополосная антенна (поляризационночувствительная) диапазона порядка $1 \div 30$ МГц. Хотя суммарная эффективная площадь таких систем невелика, за счет длительного интегрирования и эволюционного изменения расстояния между спутниками для стационарно и широкополосно излучающего объекта получаются достаточно высокая чувствительность и хорошее заполнение *UV*-плоскости.

В свободном пространстве, однако, вплоть до расстояний 100000 км существует проблема влияния низкочастотных земных помех, что было показано низкочастотной миссией WIND. Необходимо выносить такие инструменты на расстояния порядка млн километров или устанавливать их на обратной стороне Луны [37]. В последнем случае будет иметь место полная экранировка от земных помех и, естественно, отсутствие влияния ионосферы.

Техническая осуществимость таких проектов вполне реальна, и некоторые из них будут, безусловно, осуществлены в первой четверти XXI века. Новые наземные и космические низкочастотные инструменты будут эффективно дополнять друг друга, их координированное применение поднимет информативность и надежность низкочастотной радиоастрономии.

В настоящее время уже реализован ряд весьма успешных низкочастотных космических проектов, предусматривающих работу одиночных аппаратов с приемными системами диапазона от единиц кГц до десятков МГц (“Voyager”, “Galileo”, “Ulyssys”, “Cassini”, “WIND”). Эти миссии предназначены, в основном, для изучения низко-

частотного спорадического радиоизлучения Солнца и планет и являются хорошими прототипами будущих сложных космических проектов.

Уже неоднократно проводились скоординированные одновременные наблюдения на существующих наземных декаметровых радиотелескопах и вышеуказанных аппаратах. Так, с помощью NDA и аппарата WIND одновременно наблюдалось S-излучение Юпитера и его эволюция в пространстве, времени и диапазоне частот. Радиотелескоп УТР-2 также используется в совместных наземно-космических экспериментах. В настоящее время осуществляется поисковая программа по обнаружению молний в атмосфере Сатурна (SED) [38]. Событие это нечастое, но его обнаружение представляет большой физический и методический интерес. (Сатурн стал бы второй планетой после Юпитера с зарегистрированным наземными средствами спорадическим радиоизлучением.) Аппарат “Cassini”, находящийся на орбите вблизи Сатурна, ведет, в частности, мониторинг электростатических разрядов в диапазоне $1 \div 16$ МГц (RPWS-инструмент). Был зарегистрирован ряд “бурь”, весьма нестационарных во времени. Пересчет к земным условиям плотностей потока некоторых событий дает значения $50 \div 300$ Ян при длительности около 50 мс, что для УТР-2 является легко обнаружимой величиной. Научная группа “Cassini” оперативно информирует группу УТР-2 о результатах космического мониторинга SED с целью дальнейшей наземной поддержки наблюдений. С момента начала совместной программы (январь 2005 г.) значительных бурь на Сатурне не было. Эксперимент продолжается.

Обнаруженное с помощью радиотелескопа УТР-2 экзотическое явление – всплеск поглощения радиоизлучения активного Солнца [39] – сопоставлено с данными аппарата WIND. На рис. 13 (цветная вставка) показаны результаты одновременных наблюдений на УТР-2 ($10 \div 30$ МГц) и аппарате WIND ($1 \div 10$ МГц). Хотя наблюдения

на УТР-2 выполнены с намного большей чувствительностью, данные космического эксперимента дополнительно подтверждают, что всплеск поглощения наблюдался на фоне всплеска II типа. В настоящее время идет совместная с научной группой WIND обработка данных.

Особый интерес представляет подготовка наземно-космических экспериментов в рамках многообещающего проекта NASA STEREO (Solar – TERrestrial RELations Observatory) [40]. Старт проекта – февраль 2006 г. (примечательно, что этот год объявлен международным гелиофизическим годом). Будет запущено два комплексо оснащенных аппарата, в частности, с приемной аппаратурой диапазона $125 \text{ кГц} \div 16 \text{ МГц}$ и 32 МГц (SWAVES – инструмент), см. рис. 14. Аппараты будут находиться на гелиоцентрической орбите в плоскости эклиптики, удаляясь от Земли на 22° в год в разные стороны, и наблюдать стереоскопическим методом радиоизлучение, сопровождающее движущиеся СМЕ и другие проявления активности Солнца, локализуя их в пространстве. На-

учный комитет проекта поддерживает использование радиотелескопа УТР-2 для наземных одновременных (синхронных) наблюдений. Это даст третью точку наблюдения, имеется общий диапазон ($10 \div 16 \text{ МГц}$, 32 МГц), перекрывается отсутствующий на STEREO диапазон ($17 \div 31 \text{ МГц}$), реализуется более высокая чувствительность, подтвержденная, в частности, обнаружением с помощью УТР-2 всплесков II типа [14]. Поскольку существует непонятная пока связь спорадического и спокойного радиоизлучений Солнца, на УТР-2 целесообразно проводить параллельный мониторинг спокойного Солнца, что из-за невысокой чувствительности нельзя сделать на STEREO. Возникающие при движении СМЕ нестационарные и волновые процессы в межпланетной среде также интересно наблюдать методом межпланетных мерцаний (см. рис. 8 и раздел 4, подп. 1.2 и 1.3), хорошо освоенным на УТР-2. Как видно, основная цель предстоящих экспериментов – новые исследования физики Солнца, солнечной короны, межпланетной среды, солнечно-земных связей, космической погоды.

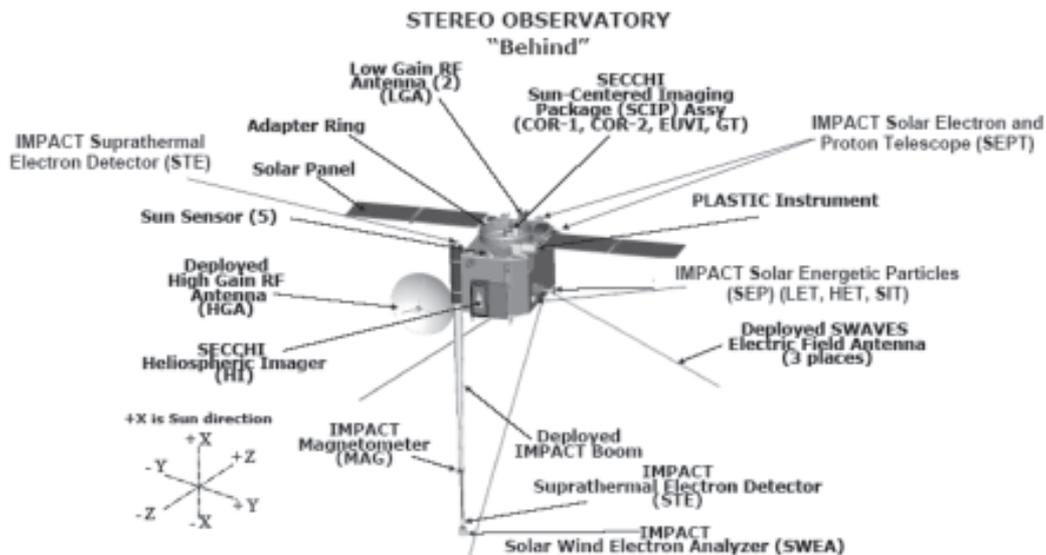


Рис. 14. Оснащение космического аппарата STEREO (NASA) научным оборудованием: SWAVES – антенна диапазона $125 \text{ кГц} \div 16 \text{ МГц}$, 32 МГц . (Рисунок предоставлен М. Кайзером)

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиоастрономия различных диапазонов волн в новом веке имеет благоприятные перспективы развития. Опережающими темпами идет прогресс в области низкочастотной радиоастрономии – в декаметровом-метровом диапазоне волн. Множество основополагающих результатов, полученных, в первую очередь, с помощью украинских радиотелескопов УТР-2 и УРАН, подтверждают высокую астрофизическую значимость радиоастрономии предельно низких частот. Очевидны целесообразность и осуществимость дальнейшего комплексного развития декаметровой радиоастрономии, включая создание гигантских наземных радиотелескопов нового поколения. Это развитие невозможно без максимального использования научного, методического и технического заделов украинской школы декаметровой радиоастрономии. Кроме того, радиоастрономический потенциал Украины делает обоснованным, целесообразным и реальным создание на ее территории новых низкочастотных эффективных радиоастрономических инструментов с размерами и возможностями гораздо большими, чем у существующих. Основные достижения низкочастотной радиоастрономии XXI века будут связаны с координированным использованием ряда гигантских радиотелескопов в различных точках земного шара и высокоэффективных инструментов космического базирования.

Автор выражает благодарность сотрудникам отделов декаметровой радиоастрономии РИ НАН Украины, принимавшим участие в создании радиотелескопов УТР-2 и УРАН и в исследованиях с их помощью. Перспективное развитие низкочастотной радиоастрономии в Украине поддерживается президентом НАН Украины академиком НАНУ Б. Е. Патонем, академиками НАНУ А. Г. Наумовцем и Я. С. Яцкивым. Автор признателен А. Лекашо, Х. Рукеру и другим зарубежным коллегам за сотрудничество, взаимопонимание и плодотворные дискуссии. В последние годы радио-

астрономическая деятельность в РИ НАНУ частично поддерживалась проектами INTAS-CNES 97-1450, INTAS 97-1964, 03-5727, Фонда фундаментальных исследований и другими проектами МОН Украины, а также проектами Национального космического агентства Украины. Автор благодарен академику НАНУ Л. Н. Литвиненко, предложившему подготовить данный обзор.

Литература

1. Брауде С. Я., Мень А. В., Седин Л. Г. Радиотелескоп декаметровых волн УТР-2 // Антенны. – 1978, – Т. 26. – С. 3-15.
2. Мень А. В., Седин Л. Г., Брук Ю. М., Шарыкин Н. К., Инютин Г. А., Гончаров Н. Ю., Мельяновский П. А., Базелян Л. Л. Принципы построения и основные характеристики радиотелескопа УТР-2 // Антенны. – 1978, – Т. 26, – С. 16-42.
3. Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковский С. Л., Шарыкин Н. К., Шепелев В. А., Инютин Г. А., Христенко А. Д., Булацен В. Г., Браженко А. И., Кошевой В. В., Романчев Ю. В., Цесевич В. П., Галанин В. В. Радиоинтерферометрическая система УРАН декаметрового диапазона волн // Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – Т. 2, №4. – С. 385-401.
4. Boischot A., Rosolen C., Aubier M. G., Daigne G., Genova F., Leblanc Y., Lecacheux A., Y. de la Noe, Pedersen B. M. A new high gain, broadband steerable array to study Jovian decametric emission // Icarus. – 1980. – Vol. 43. – P. 399-407.
5. Karashtin A. N., Komrakov G. P., Tokarev Yu. V., Shlyugaev Yu. V. Radar studies using the SURA facility // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1999. – Vol. 42, No. 8. – P. 674-686.
6. Erickson W. C., Mahoney M. J., Erb K. The Clark Lake Teepee-Tee telescope // Astrophys. J. Suppl. – 1982. – Vol. 50. – P. 403-419.
7. Коноваленко А. А. Цифровой знаковый коррелометр // Приборы и техника экспериментов. – 1981. – №6. – С. 128-137.
8. Степкин С. В. Цифровой коррелометр для радиоастрономической спектроскопии // Радиофизика и радиоастрономия. – 1996. – Т. 1, №2. – С. 255-258.
9. Konovalenko A. A., Stepkin S. V., Shalunov D. V. Low frequency carbon radio recombination lines // Radiophysics and Radioastronomy. – 2001. – Vol. 6, No. 1. – P. 21-34.
10. Lecacheux A., Rosolen C., Clerc V., Kleewein P., Rucker H. O., Boudjada M. Y., W. Van Diel.

- Digital techniques for ground-based low frequency radioastronomy // *Proc. SPIE 3357*. – 1998. – P. 533-542.
11. Abranin E. P., Bruk Yu. M., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A. The new preamplification system for UTR-2 radio telescope // *Experimental Astronomy*. – 2001. – Vol. 11. – P. 85-112.
 12. Konovalenko A. A., Lecacheux A., Rosolen C. New instrumentation and methods for the low frequency planetary radio astronomy // *Planetary Radio Emission V / Rucker H. O., Kaiser M. L., Leblank Y. (eds)*. – Vienna, Austrian Academy of Science Press., 2001. – P. 63-76.
 13. Lecacheux A., Konovalenko A. A., Rucker H. O. Using large radio telescopes at decameter wavelengths // *Planetary and Space Science*. – 2004. – Vol. 52. – P. 1357-1374.
 14. Melnik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Stanislavsky A. A., Abranin E. P., Lecacheux A., Mann G., Warmuth A., Zaitsev V. V., Boudjada M. Y., Dorovskij V. V., Zakharenko V. V., Lisachenko V. N., Rosolen C. Observations of Solar Type II bursts at frequencies 10-30 MHz // *Solar Physics*. – 2004. – Vol. 222. – P. 151-166.
 15. Sidorchuk K. M., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Lecacheux A., Denis L., Sidorchuk M. A., Rashkovskij S. L., Dorovskij V. V., Zakharenko V. V. New methods and equipment of decametric radio astronomy for continuum observations at the UTR-2 radio telescope // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. Ser.* – 2005. – No. 5. – P. 57-60.
 16. Litvinenko G. V., Rucker H. O., Vinogradov V. V., Leitner M., Shaposhnikov V. E. Internal structure of the Jovian simple S-burst obtained with the wavelet analysis technique // *Astronomy and Astrophysics*. – 2004. – Vol. 426. – P. 343-351.
 17. Фалькович И. С., Калиниченко Н. Н., Гридин А. А., Бубнов И. Н. О возможности широкополосных наблюдений межпланетных мерцаний на декаметровых волнах // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2004. – Т. 9, №2. – С. 121-129.
 18. Braude S. Ya. Decametric radio astronomy // *Astrophysics on the Threshold of 21st Century / Ed. by Kardashev N. S.* – Gordon and Breach Science Publ. – 1992. – Vol. 7. – P. 81-102.
 19. Брауде С. Я., Мень А. В. Декаметровая радиоастрономия на Украине // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 1996. – Т. 1, №1. – С. 9-28.
 20. Konovalenko A. A. Ukraine decameter wave radio astronomy systems and their perspectives, *Radioastronomy at Long Wavelengths // Geophysical Monograph 119*, Copyright by the American Geophysical Union. – 2000. – P. 311-319.
 21. Litvinenko L. N., Konovalenko A. A. Meter wavelength aperture thinthesis system // *Proceedings of Workshop on Squire Kilometer Array. – China*. – 1992. – P. 187-198.
 22. Perley R. A., Erickson W. C. A proposal for a large low frequency array located at the VLA site // *VLA Scientific Memorandum 146*. – NRAO, Socorro. – 1984. – P. 1-65.
 23. Kassim N., Erickson W. C. Meter/decameter wavelength array for astrophysics and Solar radar // *Proc. SPIE 3357*. – 1998. – P. 740-754.
 24. Van Ardenne A., Bregman J., van Haarlem M. et al. Low frequency option for SKA // *Pre-feasibility Study Report*. – NFRA, Dwingeloo. – 1999. – P. 1-39.
 25. Konovalenko A. A., Lecacheux A., Rosolen C. Large ground-based array antennas for very low frequency radio astronomy // *Perspectives on Radio Astronomy-Technologies for Large Antenna Array / Smolders A. B. and van Haarlem M. P. (eds)*. – NFRA. – 1999. – P. 115-122.
 26. Lecacheux A. The Nancay Decameter Array: A Useful Step Towards Giant New Generation Radio Telescopes for Long Wavelength Radio Astronomy, *Radio Astronomy at Long Wavelengths // Geophysical Monograph 119*. Copyright by the American Geophysical Union. – 2000. – P. 321-328.
 27. Kassim N. E., Lazio T. J. W., Ray P. S., Crane P. C., Hicks B. C., Stewart K. P., Cohen A. S., Lane W. M. The low-frequency array (LOFAR): opening a new window on the universe // *Planetary and Space Science*. – 2004. – Vol. 52, No. 15. – P. 1343-1349.
 28. Lazio J., Kassim N., Weiler K. W., Ray P., Hicks B., Crane P., Cohen A., Polisensky E., Stewart K., Lane W. Planetary and Solar radio emission studies with the Long Wavelength Array // *Planetary Radio Emission VI. Book of Abstracts*. – Graz (Austria). – 2005. – P. 123.
 29. Konovalenko A. A., Rucker H. O., Lecacheux A., Melnik V. N., Falkovich I. S., Kalinichenko N. N., Olyak M. R., Stepkin S. V., Ulyanov O. M., Megn A. V., Rashkovskij S. L., Shepelev V. A., Thide B., Tokarev Yu. V., Brazhenko A. I., Koshevoj V. V. Using largest decameter radio telescopes for Solar system study as probe and basis for developing the LOFAR-LOIS concept // *Planetary Radio Emission VI. Book of Abstracts*. – Graz (Austria). – 2005. – P. 81.
 30. Falkovich I. S., Konovalenko A. A., Kalinichenko N. N., Gridin A. A. Interplanetary medium and ionospheric investigations with new wide-band active antenna array // *Planetary Radio Emission V / Rucker H. O., Kaiser M. L., Leblanc Y. (eds)*. – Vienna, Austrian Academy of Science Press, 2001. – P. 415-421.

31. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Kalinichenko N. N., Gridin A. A., Bubnov I. N., Lecacheux A., Rosolen C., Rucker H. O. Thirty-element active antenna array as a prototype of a huge low-frequency radio telescope // *Experimental Astronomy*. – 2005. – Vol. 16, No. 3. – P. 149-164.
32. Rodriguez P. Radar studies of the Solar corona: a review of experiments using HF wavelengths // *Radio Astronomy at Long Wavelengths*, Geophysical Monograph 119. Copyright by the American Geophysical Union. – 2000. – P. 155-165.
33. Feasibility Study Report on LOIS Project / Thide B. (ed). – Institute of Space Physics, Upsala (Sweden), 2002. – P. 1-85.
34. Kopilovich L. E., Sodin L. G. Multielement System Design in Astronomy and Radio Science / Kluwer Academic Publishers, 2001. – P. 1-200.
35. Weiler K.W., Dennison B. K., Johnston K. J., Simon R. S., Erickson W. C., Kaiser M. L., Cane H. V., Desh M. D., Hammarstrom L. M. A low frequency radio array for space // *Astronomy and Astrophysics*. – 1998. – Vol. 195. – P. 372-379.
36. MacDowall R. J., Gopalswamy N., Kaiser M. L., Ball S. D., Demaio L. D., Howard R. E., Jones D. L., Kasper J. C., Reiner M. J., Weiler K. W. Microsatellite and lunar-based radio imaging of Solar bursts // *Planetary Radio Emission VI. Books of Abstracts*. – Graz (Austria). – 2005. – P. 63.
37. Bely P. Y., Laurence R. J., Volonte S., Ambrosini R. R., van Ardenne A., Barrow C. H., Bougeret J.-L., Marcaide J.-M., Woan G., Rey E., Monjas F., Lamela F., Pascual C. M., Cagigal C. Very low frequency array on the lunar far side // *Report by the Very Low Frequency Astronomy Study Team*. – ESA, Paris. – 1997. – P. 1-67.
38. Sidorchuk K. M., Konovalenko A. A., Melnik V. N., Rucker H. O., Fisher G., Lecacheux A., Abranin E. P., Stanislavskij A. A., Ulyanov O. M., Zakharenko V. V. Search of non-thermal radio emission from planets and stars at decameter wavelength // *Planetary Radio Emission VI. Books of Abstracts*. – Graz (Austria). – 2005. – P. 83.
39. Konovalenko A. A., Stanislavskij A. A., Abranin E. P., Dorovskij V. V., Melnik V. N. Absorption burst in the solar sporadic radio-emission at

- 10-30 MHz // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. Ser.* – 2005. – No. 5. – P. 78-81.
40. Kaiser M. L. The STEREO mission and the SWAVES instrument // *Planetary Radio Emission VI. Books of Abstracts*. – Graz (Austria). – 2005. – P. 60.

Перспективи низькочастотної радіоастрономії

О. О. Коноваленко

Описано стан та основні тенденції розвитку радіоастрономії. Головної уваги приділяється минулому, теперішньому та майбутньому радіоастрономії декаметрових хвиль. У цій галузі Україна має найвищий потенціал і найбільші в світі радіотелескопи УТР-2 та УРАН. Обґрунтовується концепція застосування існуючих радіотелескопів для апробації і розвитку проекту LOFAR, спрямованого на створення у найближчому майбутньому гігантських низькочастотних радіотелескопів нового покоління.

Low-Frequency Radio Astronomy Prospects

O. O. Konovalenko

The current status and principal development trends of the radio astronomy are described. The major attention is focused on the past, present and future of the decameter radio astronomy where Ukraine has the highest potential and the world-largest radio telescopes UTR-2 and URAN. The concept of the use of available radio telescopes for approval and development of LOFAR project aimed at the creation of new generation low-frequency radio telescopes in the near future is proved.