

## РАДИОАСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

doi

УДК 523.164

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

А. А. КОНОВАЛЕНКО

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

К 100-летию И. С. Шкловского

### И. С. ШКЛОВСКИЙ И НИЗКОЧАСТОТНАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ

*Предмет и цель работы: доказательство высокой астрофизической значимости низкочастотной радиоастрономии (декаметровый и смежные с ним гектометровый и метровый диапазоны волн), демонстрация приоритетных результатов украинской низкочастотной радиоастрономии и значительного вклада И. С. Шкловского в ее развитие.*

*Методы и методология: На основании теоретического анализа и астрофизических предсказаний, включая те, что были сделаны И. С. Шкловским, сформулированы требования к характеристикам высокоэффективных радиотелескопов УТР-2, УРАН, ГУРТ и методам высокочувствительных и помехоустойчивых наблюдений на низких частотах.*

*Результаты: Созданы и модернизированы радиотелескопы нового поколения УТР-2, УРАН, ГУРТ, внедрены новые методы наблюдений на низких частотах. Проведены широкомасштабные исследования Солнечной системы, Галактики и Метагалактики, позволившие обнаружить новые объекты и явления в континуальном, монохроматическом, импульсном, спорадическом космическом радиоизлучении. Отмечена роль И. С. Шкловского в развитии многих направлений низкочастотной радиоастрономии.*

*Заключение: Показаны уникальные возможности низкочастотной радиоастрономии, дающей информацию о Вселенной, недоступную другим методам астрофизики. Прогресс низкочастотной радиоастрономии, включая модернизацию крупнейших радиотелескопов УТР-2, УРАН, NDA, создание инструментов нового поколения ГУРТ, NenuFAR, LOFAR, LWA, MWA, SKA, проведение многоантенных и наземно-космических экспериментов, открывает впечатляющие возможности будущей низкочастотной радиоастрономии. Вклад выдающегося астрофизика XX века И. С. Шкловского в этот раздел актуальной астрономической науки очевиден, востребован и не будет забыт.*

*Ключевые слова: низкочастотная радиоастрономия, радиотелескоп, регистрирующая аппаратура, Солнечная система, Галактика, Метагалактика*

#### 1. Введение

Оптическая астрономия, существующая многие тысячелетия, около 80 лет назад была неожиданно дополнена радиодиапазоном, что открыло новый взгляд на Вселенную. Космическая эра в течение последнего полувека добавила внеатмосферные наблюдения во всех диапазонах электромагнитного спектра – от гамма до инфракрасного. Таким образом, как было подчеркнуто И. С. Шкловским, астрономия стала всеволновой. В свою очередь сам радиодиапазон также оказался впечатляюще широким и “всеволновым” – от субмиллиметров до километров (диапазон частот от терагерц до килогерц), что в относитель-

ном выражении составляет более 20 октав – неповторимый рекорд среди других диапазонов электромагнитного спектра.

В настоящем кратком обзоре представлено современное состояние низкочастотной радиоастрономии, в первую очередь в декаметровом диапазоне волн (частоты  $3 \div 30$  МГц), который является предельно низкочастотным для наземных наблюдений. Показана роль И. С. Шкловского в создании и применении до сих пор самых крупных в мире украинских декаметровых радиотелескопов УТР-2, УРАН, ГУРТ. Сейчас эти модернизированные инструменты продуктивно работают, интегрированы в мировые сети наземной и наземно-космической низкочастотной радиоастрономии, которая стала одним из наибо-

лее актуальных и перспективных направлений астрономической науки.

## 2. История возникновения радиоастрономии предельно низких частот

Известно, что радиоастрономия как важнейший раздел астрономической науки родилась именно в декаметровом диапазоне радиоволн, благодаря американскому радиоинженеру Карлу Янскому, открывшему космическое радиоизлучение в 1933 г. на частоте около 20 МГц (рис. 1). Практически сразу стали очевидными недостатки и проблемы низкочастотных (длинноволновых) наблюдений. К ним относятся высокая яркостная температура галактического нетеплового фона, которая определяет шумовую температуру приемной радиоастрономической системы и уменьшена быть не может в принципе; многочисленные интенсивные радиопомехи земного происхождения различных типов; негативное влияние среды распространения радиоволн, прежде всего, ионосферы; низкое угловое разрешение длинноволновых инструментов (малое отношение размера апертуры к длине волны).

Вместе с тем некоторые факты и теоретические оценки показывали, что исследования Вселенной на предельно низких частотах (декаметровый диапазон), доступных наземной радиоастрономии, могут давать уникальную информацию, которую нельзя получить другими методами ас-

трофизики и которая не дублирует данные более высокочастотных диапазонов. Вытекающие отсюда научные задачи формулировались, обосновывались и уже частично решались многими поколениями астрофизиков и радиоастрономов в течение десятилетий. Таким образом, среди физических и астрофизических явлений и объектов, изучение которых представляет большой интерес, следует назвать

- сильное взаимодействие низкочастотного радиоизлучения и космической плазмы;
- существенное превышение интенсивности нетеплового радиоизлучения над тепловым;
- формирование многих типов нетеплового радиоизлучения с крутыми спектрами:

синхротронного радиоизлучения (Галактика, магнитные поля, электронная компонента космических лучей, остатки сверхновых, квазары, радиогалактики, скопления галактик, галактические гало и т. д.);

интенсивного когерентного радиоизлучения при движении заряженных частиц и волн в магнитоактивной плазме (Солнце, Юпитер, горячие юпитеры (экзопланеты), вспыхивающие звезды, пульсары, транзиенты и т. д.);

радиоизлучения электростатических разрядов в атмосферах планет и других объектов (Земля, Сатурн и т. д.);

- большие вариации спектральных индексов нетеплового излучения на низких частотах в силу различных физических причин;

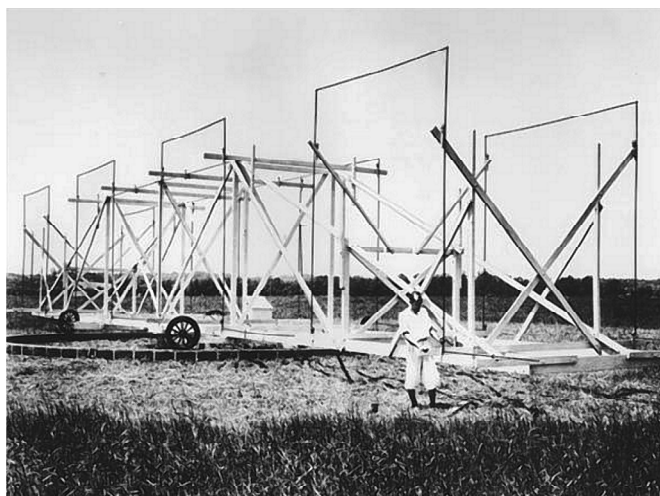
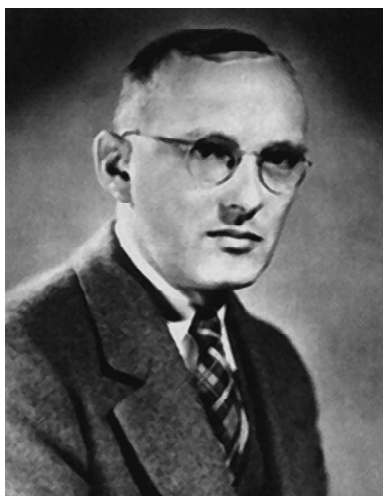


Рис. 1. Американский радиоинженер Карл Янский, открывший космическое радиоизлучение (на декаметровых волнах) около 85 лет назад

– сильная низкочастотная стимулированная радиоэмиссия для высоковозбужденных межзвездных атомов (рекомбинационные радиолнии, межзвездная среда и механизмы ее нагрева, охлаждения, ионизации и рекомбинации);

– космологические эффекты, определяемые эволюционными синхротронными потерями энергии в объектах, диффузией частиц и влияние этого на подсчеты внегалактических радиоисточников;

– космологические эффекты для спектральных линий нейтрального водорода, рекомбинационных и молекулярных линий при красных смещениях более 100 (темные века, эпохи реионизации и т. д.);

– наблюдательные проявления в изучении и предсказаниях космической погоды: все типы спорадического (особенно, всплески II типа, связанные с СМЕ – корональными выбросами массы) и спокойного радиоизлучения Солнца, межпланетные нестационарные явления и томография межпланетных мерцаний для различных элонгаций и координат.

Тот факт, что декаметровая радиоастрономия ( $\lambda_{\text{дкм}} \sim 10$  м) не дублирует результаты высокочастотной (например, сантиметровой,  $\lambda_{\text{см}} \sim 1$  см), легко показать относительным сравнением длин волн различных астрономических диапазонов (например, оптического,  $\lambda_{\text{опт}}$ , и ультрафиолетового,  $\lambda_{\text{уф}}$ ). Так,  $\lambda_{\text{дкм}}/\lambda_{\text{см}} \sim 10^3$ , точно так же  $\lambda_{\text{см}}/\lambda_{\text{опт}} \sim 10^3$ ,  $\lambda_{\text{опт}}/\lambda_{\text{уф}} \sim 10^3$  и т. д. Вместе с тем хорошо известно, насколько разнятся картины Вселенной, например, на сантиметровых волнах и в оптическом диапазоне или в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах. Неслучайно предельно низкочастотную радиоастрономию называют “новым окном” во Вселенную.

По указанным причинам после открытия К. Янского было сооружено несколько десятков радиотелескопов декаметрового–метрового диапазонов волн различного размера в России, Украине, США, Канаде, Австралии, Великобритании, Франции, Австрии, Нидерландах, Германии, Италии, Индии, Японии, Финляндии, Чили, Швеции, Польше, Ирландии. Среди наиболее ярких результатов низкочастотной радиоастрономии прошлого века можно назвать открытие спорадического радиоизлучения Юпитера Б. Берком и К. Франклином в 1955 г. в декаметровом диапазоне волн на частоте около 20 МГц, открытие первого пульсара А. Хьюшем и Дж. Белл в 1967 г. на метровых волнах вблизи частоты 80 МГц. Постепенно

возрастал интерес к этому диапазону и признавались перспективы предельно низкочастотной радиоастрономии и ее развития, хотя более 50 лет назад это требовало дополнительных доказательств.

### 3. Создание и модернизация крупнейших радиотелескопов декаметровых волн УТР-2 и УРАН

Одним из тех, кто более полувека назад правильно оценил богатые научные перспективы развития радиоастрономии декаметровых волн, был академик НАН Украины С. Я. Брауде (1911–2003 гг.), (рис. 2). По его инициативе и под его руководством коллектив харьковских специалистов в начале 60-х гг. начал создание соответствующей экспериментальной базы на новых качественном и количественном уровнях. Было принято решение построить радиотелескоп (для того периода телескоп нового поколения), который отвечал бы необходимым (зачастую противоречивым) требованиям с учетом известных аппаратно-методических проблем и ограничений наземной радиоастрономии предельно низких частот. Радиотелескоп (фазированная антенна-решетка) должен иметь большие размеры (площадь  $> 10^5$  м<sup>2</sup>), но с согласованием чувствительности и углового разрешения (с оптимальной конфигурацией и хорошим заполнением UV-плоскости); с диаграммой направленности  $< 1^\circ$ ; с широким диапазоном частот при коэффициенте перекрытия  $f_{\text{max}}/f_{\text{min}} > 2$  ( $f_{\text{min}} \sim 10$  МГц,  $f_{\text{max}} \sim 25$  МГц); с электрическим управлением лучом по обеим координатам ( $\pm 70^\circ$  от зенита); с большим полем зрения  $> 2^\circ$  (многолучевым и/или синтезным); помехоустойчивым, надежным, с эффективными системами фазирования, управления, контроля и калибровки, а также допускающим дальнейшую модернизацию в свете прогресса радиоэлектроники. Эти идеи и параметры инструмента были реализованы в начале 70-х гг., когда под Харьковом был построен радиотелескоп УТР-2 (Украинский Т-образный Радиотелескоп, 2-я модель) [1, 2], который до сих пор является самым крупным (для зенитного направления эффективная площадь составляет 140000 м<sup>2</sup>) и самым чувствительным в обеспеченном сейчас диапазоне  $8 \div 32(40)$  МГц (рис. 3). Если принять типичные полосы анализа и время интегрирова-



Рис. 2. Академики С. Я. Брауде и Б. Е. Патон в радиоастрономической обсерватории УТР-2 (1971 г.)

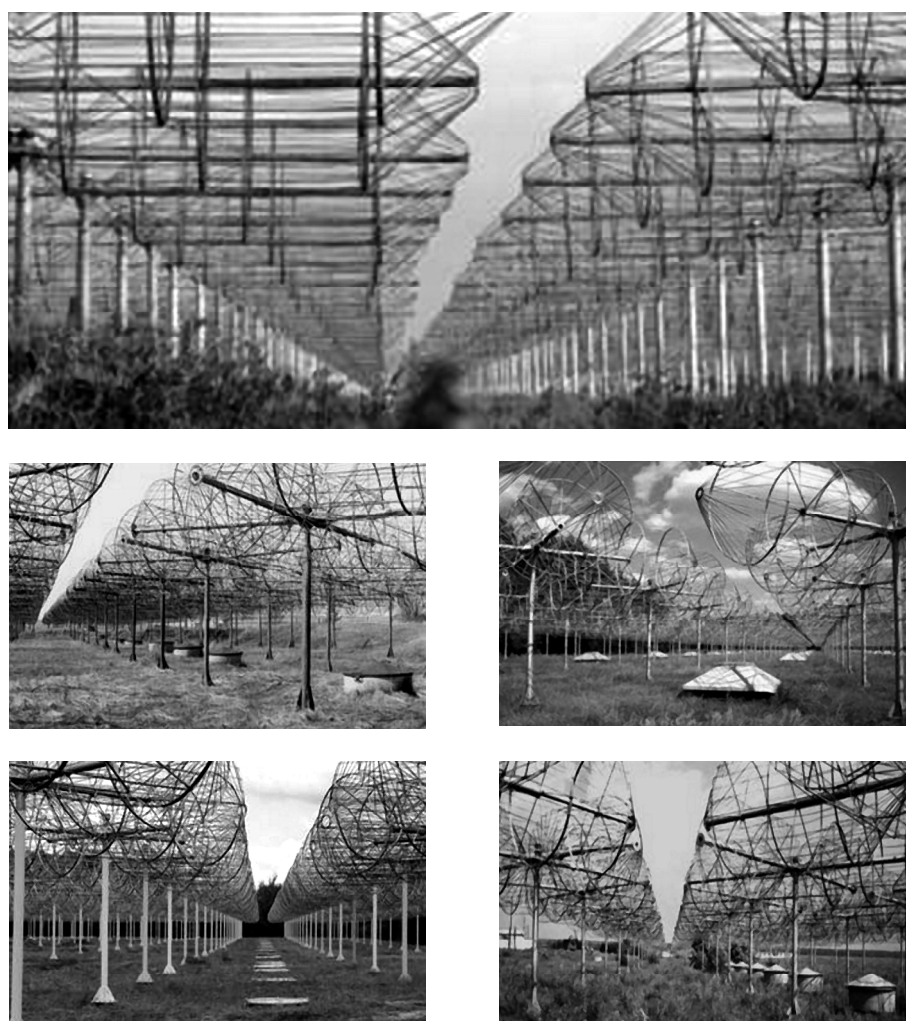


Рис. 3. Антенна Север–Юг радиотелескопа УТР-2 (верхняя панель) и радиотелескопы УРАН-1, ..., УРАН-4

ния равными 3 МГц и 1 ч соответственно [3], пренебречь эффектом “спутывания” (для большинства задач это допустимо), то флуктуационная чувствительность в середине диапазона (яркостная температура галактического фона вблизи частоты 20 МГц в среднем равна 50000 К со спектральным индексом  $-2.6$ ) составит  $\sim 10$  мЯн. В ряде экспериментов на УТР-2, например, по изучению наиболее слабых объектов – пульсаров и спектральных линий, где реализованы огромные времена интегрирования и полосы анализа (тысячи часов и десятки мегагерц), чувствительность достигает долей миллианских.

В период создания радиотелескопов (в начале более простых прототипов, затем самого крупного) неоценимую помощь и поддержку оказывал академик Б. Е. Патон (рис. 2). Став в 1962 г. президентом НАН Украины, он до настоящего времени всесторонне поддерживает развитие низкочастотной радиоастрономии.

Необходимо отметить, что в тот период активным консультантом и советником (неформальным!) был И. С. Шкловский. С ним обсуждалось множество вопросов, касающихся выбора диапазона частот, структуры радиотелескопа, методов наблюдений, возможностей перспективных астрофизических исследований. На рис. 4 представлено уникальное фото, сделанное ровно 40 лет назад в Харькове во время Всесоюзной радиоастрономической конференции 1976 г. На фото присутствуют практически все основоположники отечественной радиоастрономии. Несколько поколений харьковских радиоастрономов с благодарностью вспоминают дискуссии с И. С. Шкловским, его советы, поддержку и критику. Он не раз бывал в радиоастрономической обсерватории УТР-2 (ныне она носит имя С. Я. Брауде), интересовался конструкцией, параметрами радиотелескопа и наблюдениями на нем. Сорок лет назад он оставил остроумный автограф в книге отзывов для гостей обсерватории (рис. 5). Документальное фото, представленное рядом, сделанное также на заходе Солнца во время равноденствия, подтверждает “идею” И. С. Шкловского о правильности ориентации антенны Восток–Запад радиотелескопа УТР-2.

В течение 70–80-х гг. на основе радиотелескопа УТР-2 была построена система декаметровых

радиоинтерферометров для наблюдения радиоисточников в режиме РСДБ (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами) УРАН (Украинский радиоинтерферометр Академии наук), рис. 3 [2, 4]. Кроме УТР-2, в нее входят еще 4 достаточно крупных (с эффективными площадями от 28000 до 7000 м<sup>2</sup>) радиотелескопа – УРАН-1, ..., УРАН-4, образуя с УТР-2 базы длиной от 42 до 950 км и обеспечивая поляриметрические возможности. На рис. 6 показано размещение на территории Украины всех названных радиотелескопов с расстояниями между ними. Радиотелескопы УТР-2, УРАН-1, УРАН-4 принадлежат Радиоастрономическому институту НАН Украины (РИ НАНУ, г. Харьков), УРАН-2 – Полтавской гравиметрической обсерватории Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины (ПГО НАНУ, г. Полтава), УРАН-3 – Физико-механическому институту им. Г. В. Карпенко (ФМИ НАНУ, г. Львов). Отметим, что суммарная эффективная площадь всех указанных радиотелескопов весьма велика и достигает 20 % “квадратного километра”. В настоящее время система УРАН позволяет определять модули функции видимости для различных пар радиотелескопов и их зависимости от длины базы, частоты и часового угла при слежении за источниками. Структура исследуемых объектов с разрешением до единиц угловых секунд определяется модельными методами на основании измеренных данных и радиоизображений, известных на высоких частотах. Радиотелескопы УТР-2 и УРАН-1, ..., УРАН-4 активно работают как координированно (РСДБ), так и независимо по множеству научных программ. В табл. 1 детально представлены характеристики всех радиотелескопов, включая физические и конструктивные параметры.

С момента создания радиотелескопы УТР-2 и УРАН наряду с активным применением во многих астрофизических исследованиях параллельно без остановки функционирования модернизировались как в части антенной и приемно-регистрирующей аппаратуры, так и в области методов наблюдений, в первую очередь в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины. Главная цель этой модернизации заключается в снижении негативных мешающих факторов, свойственных декаметровой радиоастрономии. Ниже перечислены эти мешающие факторы (они



Рис. 4. Во время Всесоюзной радиоастрономической конференции (сентябрь 1976 г., г. Харьков). Слева направо: И. С. Шкловский, А. А. Пистолькорс, Н. С. Кардашев, С. Я. Брауде, А. Д. Кузьмин, А. Е. Соломонович, Г. Г. Гетманцев, Р. Л. Сороченко, Ю. Н. Парийский

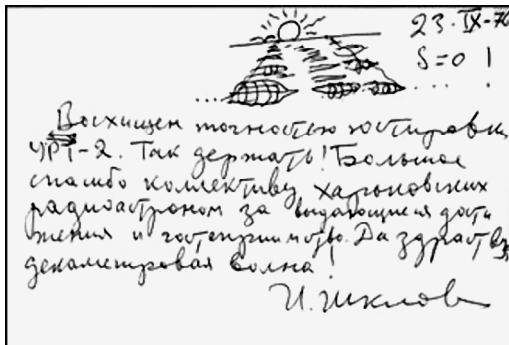


Рис. 5. Автограф И. С. Шкловского в книге отзывов, оставленный во время посещения обсерватории УТР-2 в день осеннего равноденствия (1976 г.)



Рис. 6. Размещение радиотелескопов УТР-2 и УРАН-1, ..., УРАН-4 на территории Украины

Таблица 1. Основные параметры низкочастотных радиотелескопов Украины

Радиотелескоп	Размещение	Частотный диапазон, МГц	Максимальная эффективная площадь, м <sup>2</sup>	Число элементов, поляризация	Расстояние от УТР-2(LOFAR), км	Синтезированное или РСДБ разрешение на 25 МГц
УТР-2	г. Харьков, (РИ НАНУ)	8 ÷ 32	140000	2040 1 линейная	0 (~ 2000)	25' × 25'
УРАН-1	г. Змиев, (РИ НАНУ)	8 ÷ 32	5500	96 2 линейных	42 (~ 1900)	15"
УРАН-2	г. Полтава, (ПГО НАНУ)	8 ÷ 32	28000	512 2 линейных	150 (~ 1800)	5"
УРАН-3	г. Львов, (ФМИ НАНУ)	8 ÷ 32	14000	256 2 линейных	915 (~ 1000)	1'
УРАН-4	г. Одесса, (РИ НАНУ)	8 ÷ 32	7300	128 2 линейных	613 (~ 1500)	1.3'

упомянуты также в Разделе 2) и методы их уменьшения и/или устранения.

*Высокая яркостная температура галактического фона:*

– большая эффективная площадь радиотелескопа ( $10^4 \div 10^6$  м<sup>2</sup>);

– **многоантенные наблюдения.**

*Земные помехи (естественные, искусственные, узкополосные и широкополосные, внешние и внутренние):*

– большая эффективная площадь антенны, высокая направленность, малый уровень боковых лепестков;

– расчеты и знание параметров антенны, знание параметров помех и их мониторинг;

– высокий динамический диапазон антенного усиления и антенных узлов;

– высокие динамический диапазон, частотное и временное разрешения регистрирующей аппаратуры;

– широкополосная антенна;

– многолучевой прием (ON-OFF режимы), пространственная селекция, картографирование;

– надежная экранировка аппаратуры;

– учет времени и сезона наблюдений;

– специальная обработка, идентификация и поиск признаков помеховых и полезных сигналов (очистка, фильтрация, распознавание образов и т. д.);

– большая наблюдательная статистика и повторяемость результатов;

– **внеионосферные наблюдения и наблюдения на обратной стороне Луны;**

– **многоантенные наблюдения.**

*Влияние ионосферы (рефракция, мерцания, поглощение):*

– высокая направленность антенны, большая площадь, рабочая полоса частот, поле зрения (многолучевость, ON-OFF режимы, картографирование);

– знание параметров ионосферы и ее мониторинг;

– учет времени и сезона наблюдений;

– адаптивная антенна;

– специальная обработка (очистка, фильтрация, поиск признаков полезных сигналов в нестационарных условиях);

– большая наблюдательная статистика и повторяемость результатов;

– **внеионосферные наблюдения и наблюдения на обратной стороне Луны;**

– **многоантенные наблюдения.**

*Низкое угловое разрешение одиночного радиотелескопа (малое отношение  $D/\lambda$ ):*

– **многоантенные наблюдения, внеионосферные наблюдения (РСДБ Земля–Земля, Земля–космос, космос–космос).**

Необходимо подчеркнуть, что постоянный прогресс электронной, цифровой, компьютерной техники делает упомянутую модернизацию экспериментальных средств и методов естественной и эффективной. Принципиальному улучшению параметров подверглись системы антенного усиления [5], контроля, калибровки, автоматизации, регистрации, архивации, передачи и обработки данных [2]. Современная специально разработанная система регистрации на основе цифровых спектральных процессоров и FPGA (Field-

Programmable Gate Array) технологий имеет следующие параметры: полоса анализа – 33 МГц, количество каналов – 8192, частотное и временное разрешения – 4 кГц и 0.5 мс, разрядность АЦП – 16, динамический диапазон – 90 дБ. Имеется 5 (по количеству лучей УТР-2) двухвходовых (для антенн Север–Юг и Запад–Восток) комплектов аппаратуры, которые могут работать в режиме быстрого фурье-анализа в реальном времени с определением автоспектров и комплексных кросс-спектров и в “waveform” режиме. Таким образом, на радиотелескопе УТР-2 обеспечено лучшее для декаметрового диапазона волн сочетание параметров антенны и аппаратуры. Эти параметры совместно с разработанными методами наблюдений позволяют максимально снизить негативные факторы низкочастотной радиоастрономии. В табл. 2 показаны характеристики регистрирующей аппаратуры для УТР-2 и УРАН (широкополосного малошумящего цифрового радиоприемника DSPZ (Digital Spectrum Polarimeter Z modification)), а также для новой антенны ГУРТ (широкополосного цифрового приемника ADR (Advanced Digital Receiver)), которая описана ниже [6]. Кроме того, на рис. 7 представлен внешний вид аппаратного зала радиотелескопа УТР-2, созданного в конце 60-х гг., и нового помещения с регистрирующей аппаратурой в сопоставлении их основных параметров.

Таблица 2. Параметры регистрирующей аппаратуры для УТР-2, УРАН (DSPZ) и ГУРТ (ADR)

Параметры	DSPZ	ADR
Частотный диапазон, МГц	33	80
Количество частотных каналов	8192	16384
Частотное разрешение, кГц	4	6
Временное разрешение, мс	0.5	2
Разрядность АЦП, бит	16	16
Динамический диапазон, дБ	90	90
Количество входов	2	2
Быстрое преобразование Фурье	да	да
Wave-form режим (не ограничен по разрешению)	да	да
Вычисление кросс-спектров	да	да
Сумма-разностный режим	нет	да
Нормирование сигналов	нет	да
Задержка сигналов	нет	да

#### 4. Некоторые результаты декаметровой радиоастрономии

С помощью описанных средств проведен большой объем астрофизических исследований космических объектов, от объектов из ближайших окрестностей Земли, солнечной системы, Галактики до самых удаленных радиогалактик и квазаров (объекты и явления для исследования упомянуты также в Разделе 2). Доказаны высокие информативность и астрофизическая значимость радиоастрономии декаметровых волн. Стали возможными прецизионные измерения меняющихся в широких пределах пространственных, энергетических, спектральных, временных, поляризационных характеристик излучения астрофизических объектов, несущих ценную информацию и о процессах в масштабах Вселенной, и о тонких атомных эффектах.

Ниже представлены некоторые избранные результаты декаметровой радиоастрономии последних лет, которые имеют непосредственное отношение к исследованиям и астрофизическим предсказаниям И. С. Шкловского.

С помощью радиотелескопов УТР-2, УРАН и новой приемно-регистрирующей аппаратуры активно исследуется широкополосное радиоизлучение Солнца даже на частотах менее 10 МГц (рис. 8). Обнаружено множество типов спорадического декаметрового излучения, включая тонкие пространственно-частотно-временные структуры, например спайки [7]. Радиоизлучение в диапазоне  $8 \div 3$  МГц возникает на расстояниях в  $1.5 \div 3$  солнечных радиуса, т. е. в солнечной короне. Именно эту область солнечной атмосферы детально изучал И. С. Шкловский, впервые проанализировав и доказав модель горячей ( $\sim 10^6$  К) солнечной короны и рассмотрев спорадическое радиоизлучение в ней [8, 9]. На радиотелескопах УТР-2, УРАН-2, УРАН-3 исследуется также радиоизлучение спокойной короны Солнца. Оно является тепловым, и потому его интенсивность резко уменьшается с понижением частоты по практически квадратичному закону. Тем не менее высокие чувствительность и разрешение применяемых радиотелескопов позволяют детально изучать горячую корону Солнца и все типы ее излучения.

Говоря об изучении короны, нельзя не вспомнить об исторически важном для астрономии и





Параметры и режимы антенны	Старая аппаратура	Новая аппаратура
Диапазон частот, МГц	10 ÷ 25	8 ÷ 32(40)
Полоса приема, МГц	6 × 1 = 6	24(32)
Калибровка, контроль, аппаратура, программное обеспечение	Обеспечены частично	Обеспечены
Чувствительность, дБ (превыш. фона над собств. шумами)	~ 2	> 6
Параметры и режимы оборудования		
Количество каналов	5 лучей × 12 рег. = 60	5 × 2 × 8192 = 81920
Полоса приема	10 кГц × 60 = 600 кГц	24(32) МГц
Временное разрешение, мс	20	0.25 (до 0.001)
Частотное разрешение, кГц	10	4 (до 0.1)
Динамический диапазон, дБ	40	90
Чувствительность, Ян	10	0.01
Режимы измерений	Энергетические спектры, постдетекторная регистрация	Энергетические спектры, комплексные кросс-спектры, преобразование Фурье в реальном времени, “waveform”-режим

Рис. 7. Аппаратный зал радиотелескопа УТР-2 (1970 г.) и современная регистрирующая аппаратура, сопоставление их параметров

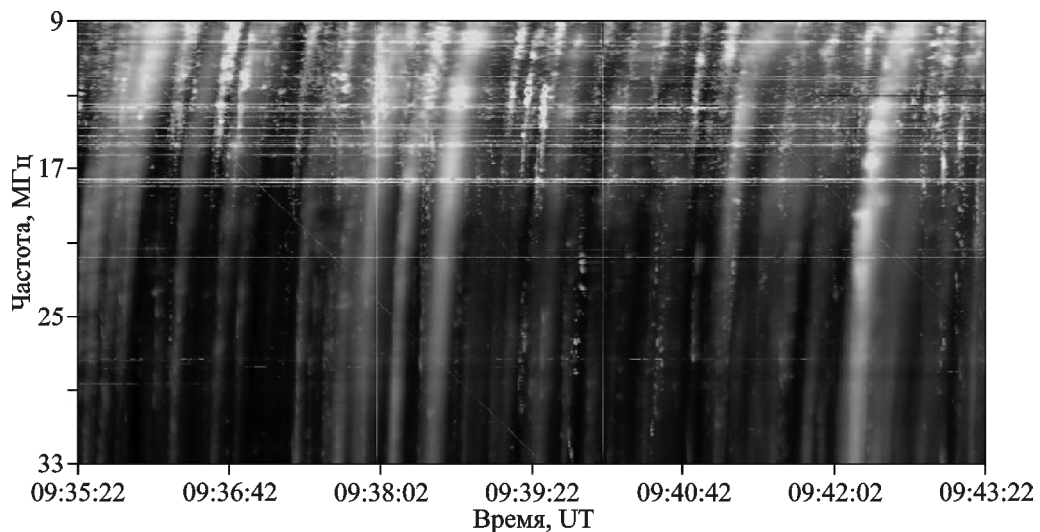


Рис. 8. Динамический спектр радиоизлучения Солнца, включающий всплески типа III, IIIб, спайки

радиоастрономии события – экспедиции с активным участием И. С. Шкловского к берегам Бразилии в 1947 г. на теплоходе “Грибоедов” для наблюдения солнечного затмения [10]. Одной из главных задач была оценка интенсивности радиоизлучения короны. Как это ни парадоксально, но и спустя 70 лет подобные исследования во время солнечных затмений (в частности в 2008 г.) для изучения короны и сопутствующих эффектов, в том числе в дециметровом диапазоне, продолжают [11].

Одной из немногих задач, которые не решал И. С. Шкловский, было исследование радиоизлучения планет, в том числе низкочастотного. Тем не менее в его основополагающих работах, посвященных поиску внеземных цивилизаций [12], анализируются в первую очередь астрономические аспекты проблемы, включая экзопланетную астрономию. К сожалению, И. С. Шкловский не дожил до того времени, когда обнаружение экзопланет стало массовым явлением и вывело на новый уровень изучение солнечно-земных и звездно-планетных связей, а также поиск активных звезд и планет-гигантов (горячих юпитеров) методами низкочастотной радиоастрономии [13]. Уже более 10 лет на радиотелескопе УТР-2 проводится поиск подобных явлений, сопровождаемый тщательным изучением спорадического и импульсного дециметрового радиоизлучения Юпитера [14] (рис. 9), пульсаров [15] (рис. 10) и других объектов.

Хорошо известен приоритетный вклад И. С. Шкловского в физику межзвездной среды и ее радиоспектроскопию. Он первым детально проанализировал возможности обнаружения линии HI [16], показав огромные перспективы подобных исследований, что впоследствии полностью подтвердилось. Им также были предсказаны межзвездные линии OH, CN, дейтерия [17], нейтрального азота [18]. Первые три вида линий были успешно обнаружены, а вблизи частоты линии азота  $f = 26.13$  МГц в середине 70-х гг. впервые в мире был начат глубокий радиоспектроскопический поиск с помощью УТР-2. Спектральная линия на этой частоте была надежно обнаружена [19], однако она оказалась не линией азота, а необычной рекомбинационной линией поглощения ионизированного углерода с главным квантовым числом 631 [20, 21]. Это несколько не

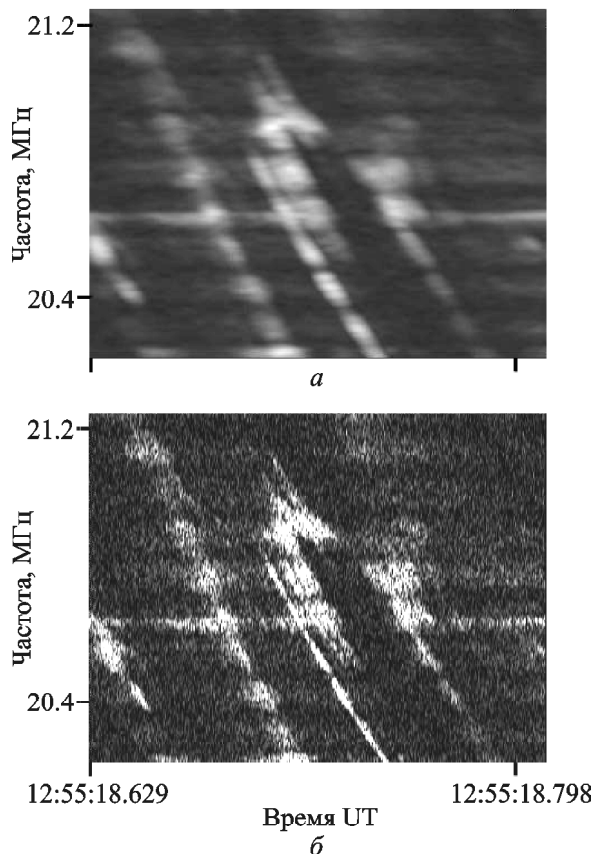


Рис. 9. S-излучение Юпитера, зарегистрированное со сверхвысоким частотно-временным разрешением 2 мс (а) и 60 мкс (б) на радиотелескопе УТР-2 в 2013 г.

огорчило И. С. Шкловского, так как он понимал, какие принципиально новые многообещающие возможности открываются в диагностике среды с помощью линий данного типа. Как показали исследования рекомбинационных линий на УТР-2, пространственное распределение ионизированного углерода хорошо совпадает с холодными облаками нейтрального водорода, линии которого были астрофизически предсказаны И. С. Шкловским. Кроме того, рекомбинационные линии как астрофизический феномен были предсказаны его учеником Н. С. Кардашевым в 1959 г. [22]. В настоящее время радиотелескоп УТР-2 по-прежнему остается наиболее эффективным для исследования предельно низкочастотных рекомбинационных линий [23, 24]. Проводятся широкомасштабные наблюдения дециметровых линий в Галактике, причем впервые с одновременной регистрацией в общей полосе анализа от десятков до сотен линий, что уникальным образом увеличивает чув-

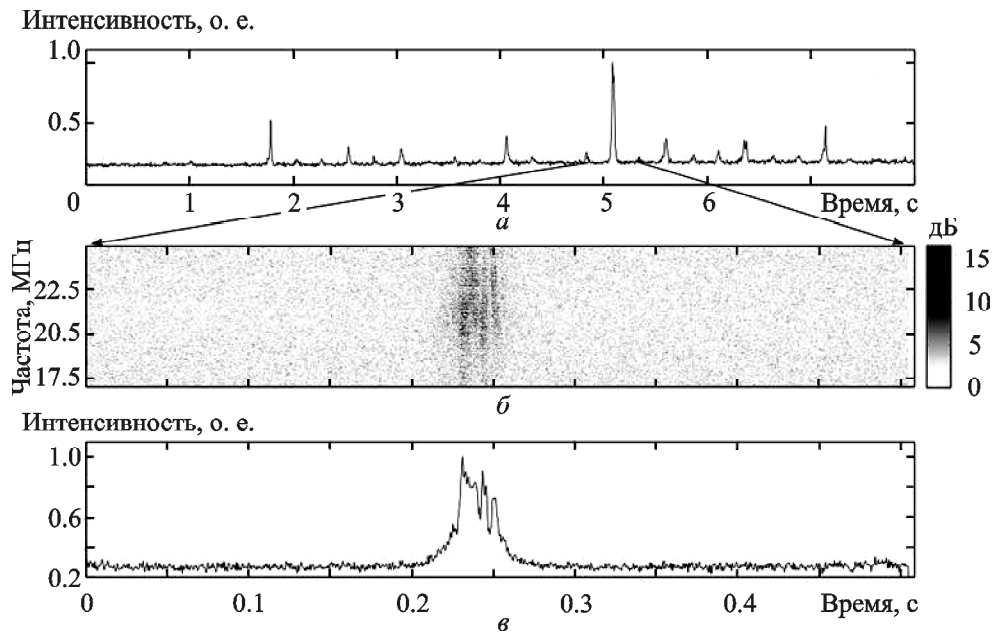


Рис. 10. Обнаружение индивидуальных импульсов пульсаров (а), anomalously интенсивных импульсов (б) и их тонкой структуры (в)

ствительность измерений. Удалось зарегистрировать рекордно высокие квантовые состояния межзвездных атомов на уровнях более 1000 [25]. Диаметр столь высоковозбужденных атомов огромен – порядка 0.1 мм (рис. 11).

Еще на заре развития радиоастрономии И. С. Шкловский одним из первых начал детальное изучение механизмов космического радиоизлучения [10]. Хорошо известны его работы по теории нетеплового синхротронного радиоизлучения нашей Галактики, остатков сверхновых и других объектов Вселенной. Еще в начале 50-х гг. он показал возможность обнаружения теплового радиоизлучения эмиссионных туманностей, предложил поиск этого радиоизлучения, методы разделения тепловой и нетепловой составляющих излучения. Нетепловое радиоизлучение со степенным спектром с резким возрастанием интенсивности к низким частотам интересно наблюдать именно на декаметровых волнах, что и делается на радиотелескопах УТР-2 и УРАН [2]. На рис. 12 показана соответствующая высокоточная карта фона на частоте 20 МГц. Интересно, что на картах непрерывного радиоизлучения Галактики эмиссионные туманности (области III) на низких частотах выглядят не так, как на высоких (где их и предсказывал И. С. Шкловский), т. е. проявляются не в эмиссии, а в поглощении [26] (рис. 13).

Таким образом, известны следующие механизмы космического радиоизлучения, в объяснение и развитие которых определяющий вклад внес И. С. Шкловский: нетепловой (синхротронное излучение при движении релятивистских электронов в магнитном поле и излучение при движении волн и пучков частиц в магнитоактивной плазме), тепловой (эмиссионные туманности и др.) и линейчатый (спектральные линии). К сожалению, И. С. Шкловский не успел приложить свой талант к объяснению еще одного механизма космического радиоизлучения – механизма радиоизлучения, образуемого в результате электростатических разрядов в атмосфере планеты (Сатурна), которое было открыто на радиотелескопе УТР-2 около 10 лет назад [27] (рис. 14).

Одним из важных методических результатов И. С. Шкловского было предложение в 50-х гг. использовать метод лунных покрытий для повышения углового разрешения и точности определения координат космических объектов [28]. Этот метод имел особое значение для низкочастотной радиоастрономии и был реализован на радиотелескопе УТР-2 в начале 70-х гг., еще до внедрения методов РСДБ в декаметровый диапазон.

Ряд других астрофизических результатов декаметровой радиоастрономии последних лет представлен в обзорной работе [2]. Прямо или кос-

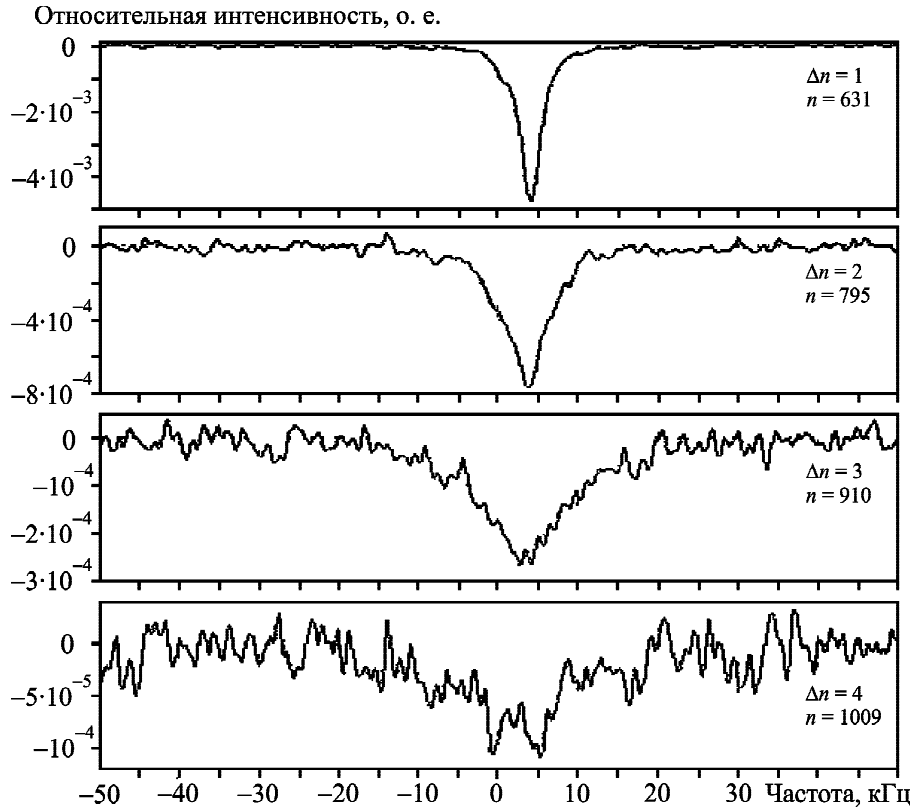


Рис. 11. Обнаружение рекомбинационных радиолиний межзвездных ридберговских атомов, соответствующих главным квантовым числам  $n$  более 1000

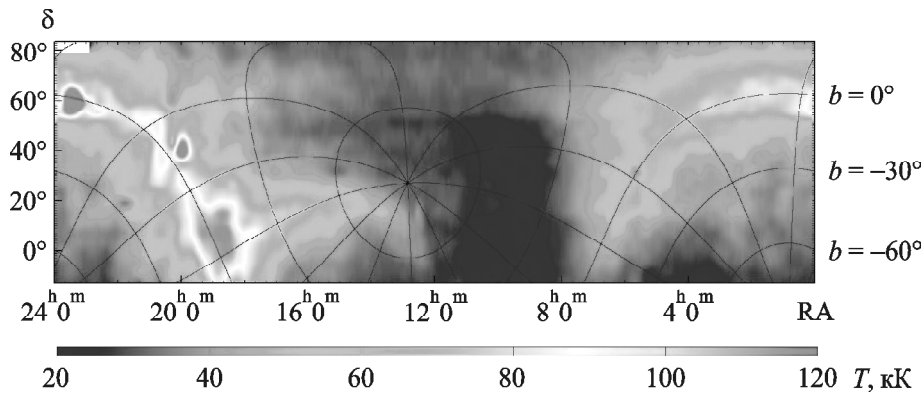


Рис. 12. Карта распределения интенсивности галактического нетеплового радиоизлучения на дециметровых волнах (20 МГц)

венно И. С. Шкловский имеет отношение ко многим из них.

### 5. Перспективы низкочастотной радиоастрономии

Описанные выше радиотелескопы хотя и имеют максимальные для дециметровых волн размеры и наивысшую флуктуационную чувствительность,

однако не являются единственными в низкочастотной радиоастрономии. В течение последних десяти лет имеет место ее бурный прогресс, который связан как с глубокой модернизацией существующих инструментов, так и с созданием радиотелескопов нового поколения. К ним относятся строящиеся и уже введенные в работу системы и проекты LOFAR (Нидерланды и другие европейские страны) для наблюдений в диапазо-

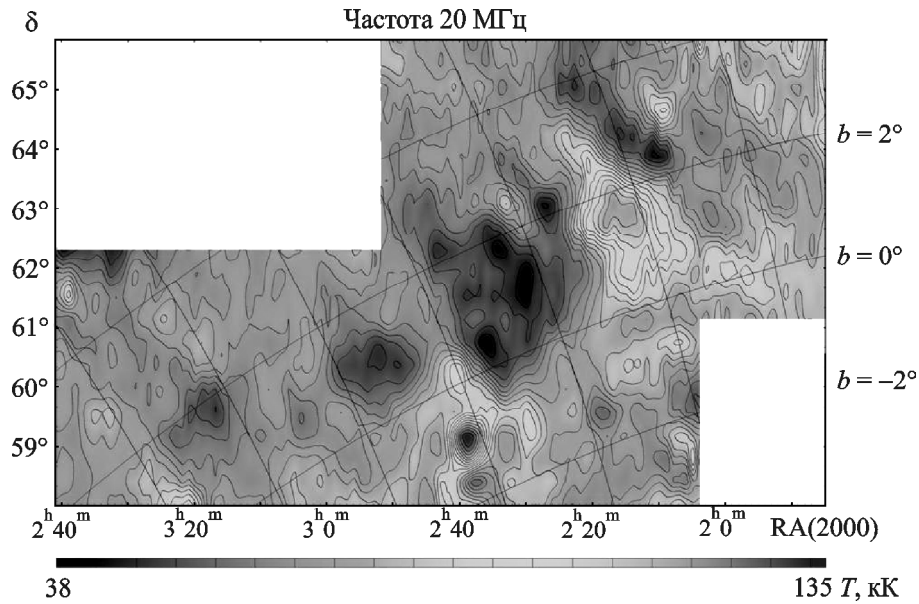


Рис. 13. Фрагмент карты нетеплового галактического радиоизлучения с эмиссионными туманностями, зарегистрированными в поглощении на частоте 20 МГц

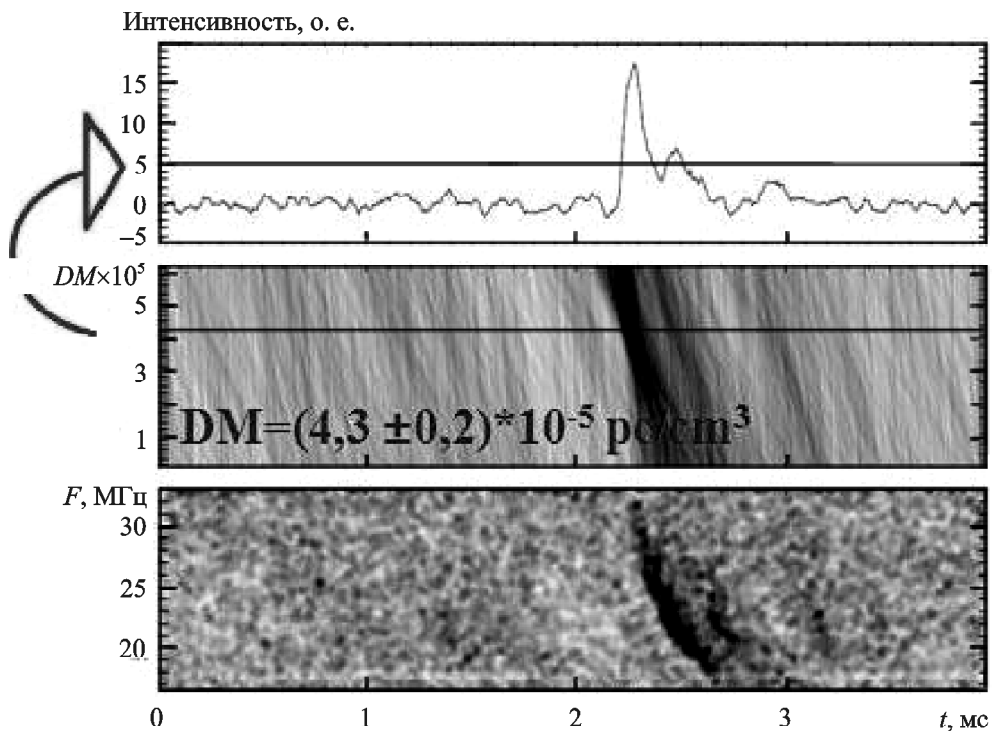


Рис. 14. Обнаружение радиоизлучения электростатических разрядов в атмосфере Сатурна на УТР-2

нах  $(10)30 \div 80$  МГц и  $110 \div 240$  МГц [29], LWA (США) в диапазоне  $20 \div 80$  МГц [3], MWA (Австралия) в диапазоне  $50 \div 300$  МГц, SKA-low в диапазоне  $200 \div 1000$  МГц и другие проекты.

В системах используются последние достижения электронных, телекоммуникационных и информационных технологий, обеспечиваются высокие чувствительность и разрешение, большое поле

зрения и возможности картографирования. Параллельно реализуются проекты, дополняющие указанные, но акцентированные на реализацию большой аддитивной эффективной площади  $> 10^4 \text{ м}^2$  с высоким фактором заполнения элементов [2, 24]. Обеспечиваются также максимальная помехоустойчивость и динамический диапазон вплоть до предельно низких частот порядка 8 МГц, высокие чувствительность и равномерность коэффициента передачи во всей рабочей полосе частот. Такие системы координировано создаются во Франции – NenuFAR (диапазон 8 ÷ 80 МГц [30]), и в Украине (как расширение стоящего рядом УТР-2) – ГУРТ (диапазон 8 ÷ 80 МГц с полным совпадением, а также превышением диапазона частот УТР-2), [2].

Радиотелескоп ГУРТ состоит из 25-элементных активных субрешеток с аналоговым временным фазированием отдельных субрешеток и цифровым между ними. Системы усиления, фазирования, телекоммуникаций, контроля, управления и регистрации уже установлены на 5 субрешетках (из 11 смонтированных), которые используются в наблюдениях (рис. 15). Сверхширокополосная цифровая система регистрации нового поколения имеет различные функциональные возможности, обеспечивает полосу анализа 80 МГц, количество каналов 16384, частотное и временное разрешения в режиме фурье-анализа в реальном времени 6 кГц и 2 мс (в режиме wave-form без ограничений), разрядность АЦП 16 бит, динамический диапазон 90 дБ.

Две из указанных субрешеток, разнесенные на расстояние 83 м в направлении Восток–Запад, используются для изучения одного из интереснейших явлений, предсказанных И. С. Шкловским, – векового уменьшения плотности потока остатка сверхновой Кассиопея А [31]. На рис. 16 показаны радиоинтерферометрические отклики двухантенного интерферометра ГУРТ для Кассиопеи А и Лебеда А (синусная и косинусная компоненты) [32]. Из рисунка видны высокие отношение сигнал/шум и точность измерений. Согласно измерениям, проведенным в 2014 г., отношение плотностей потоков излучения Кассиопеи А и Лебеда А составляет  $1.12 \pm 0.01$ . В 1956 г. оно было равным  $1.85 \pm 0.25$ , т. е. за 58 лет плотность потока радиоизлучения Кассиопеи А вблизи частоты 40 МГц уменьшилась в 1.7 раза, что хорошо соответствует теории и предсказаниям И. С. Шкловского.

Система ГУРТ создается по принципу постепенного наращивания площади, при котором установленные субрешетки уже работоспособны. Доказано, что даже при сравнительно небольших размерах субрешеток ГУРТ (эффективная площадь каждой около  $500 \text{ м}^2$ ) возможны разнообразные качественные астрофизические исследования многих объектов солнечной системы, Галактики и Метагалактики, особенно при синхронных наблюдениях на радиотелескопе УТР-2, более узкополосном (в  $\approx 3$  раза), но имеющем гигантскую эффективную площадь. Это иллюстрируется рис. 17, где показаны динамические спектры солнечных всплесков II типа, измеренные од-



Рис. 15. Внешний вид субрешеток ГУРТ

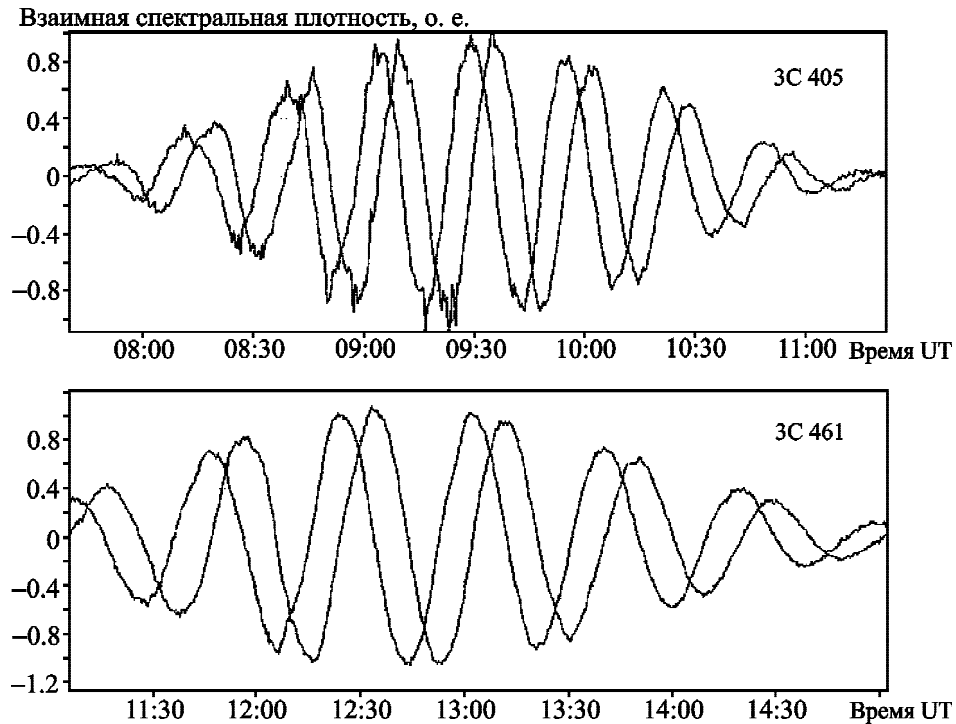


Рис. 16. Интерферометрические отклики (время – интенсивность), измеренные на субрешетках ГУРТ вблизи частоты 40 МГц, для источников Кассиопея А и Лебедь А

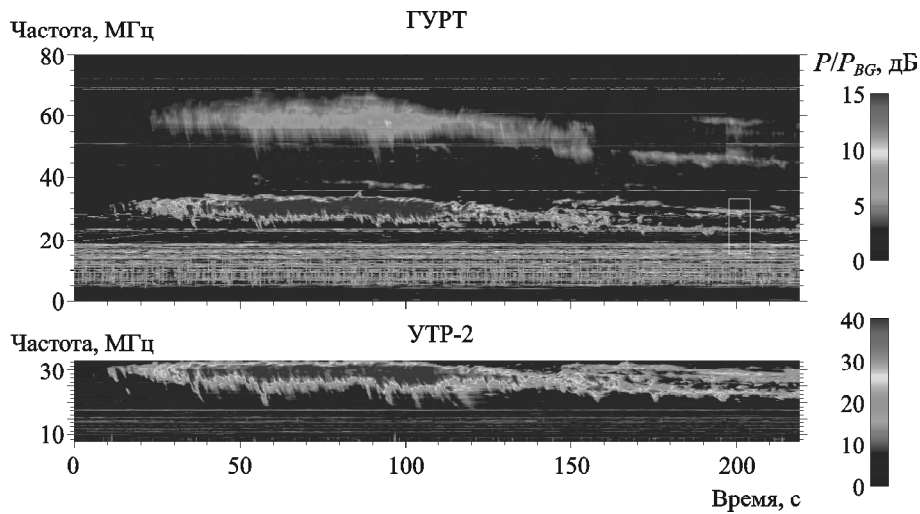


Рис. 17. Синхронные наблюдения солнечных всплесков на УТР-2 ( $8 \div 32$  МГц) и ГУРТ ( $8 \div 80$  МГц)

новременно на УТР-2 и одной субрешетке ГУРТ (в более широкой полосе регистрируется также вторая гармоника всплеска) [33]. Из рисунка видно (см. также Раздел 3), насколько ниже уровень помех относительно полезного сигнала при использовании гигантского высоконаправленного радиотелескопа (УТР-2), чем при использовании хотя и качественной, но небольшой 25-эле-

ментной субрешетки, у которой площадь меньше в  $\approx 400$  раз, (на 26 дБ). Более высокая направленность увеличивает выигрыш еще в несколько раз. Таким образом, уровень солнечного радиоизлучения относительно помех в дневное время, сосредоточенных, в основном, на частотах ниже 18 МГц, при использовании крупной антенны становится выше на  $25 \div 30$  дБ.

Широкие возможности применения субрешеток ГУРТ определяются, в частности, сверхширокой рабочей полосой частот антенн и систем регистрации; высокой чувствительностью по яркостной температуре; помехоустойчивостью; равномерностью коэффициента передачи; электронным сканированием неба; поляриметрическими возможностями; высоким фактором заполнения элементов; мониторингом параметров грунта, помех, ионосферы; хорошим совпадением теоретических расчетов параметров антенн и экспериментов; высокой степенью автоматизации; надежностью, простотой эксплуатации; экономичностью [33].

В последние годы было показано, что одним из наиболее радикальных путей снижения негативных факторов в низкочастотной (особенно декаметровый) радиоастрономии и повышения надежности и качества измерений в целом (см. Раздел 3) является синхронное координированное применение крупных антенн, разнесенных на расстояния от единиц до тысяч километров (многоантенная синергия), (рис. 18). Уже проведен ряд успешных синхронных наблюдений Солнца, Юпи-

тера, Сатурна, пульсаров, экзопланет и других объектов на радиотелескопах УТР-2, УРАН, ГУРТ (Украина); NDA, NenuFAR, (Франция); LOFAR (Нидерланды); LWA (США) и др. Дополнительные перспективы предельно низкочастотной радиоастрономии обеспечивают также координированные измерения за пределами ионосферы с помощью крупнейших наземных радиотелескопов (декаметровый диапазон) и космических миссий с приемными системами декаметрового – гектометрового диапазонов [34]. Реализованы синхронные эксперименты с космическими аппаратами WIND, STEREO, Cassini, начаты совместные наблюдения с новой миссией Juno, готовятся исследования по будущим проектам Solar Orbiter, Far Side Explorer и др. На рис. 19 показана схема наземно-космических экспериментов (УТР-2 + STEREO), демонстрирующая дополнительные возможности изучения Солнца и солнечно-земных связей [35].

Интересно отметить, что еще в 1958 г. (всего через год после запуска первого искусственного спутника Земли) И. С. Шкловский в соавторстве с В. Л. Гинзбургом и Г. Г. Гетманцевым впервые



Рис. 18. Размещение низкочастотных радиотелескопов на территории Европы



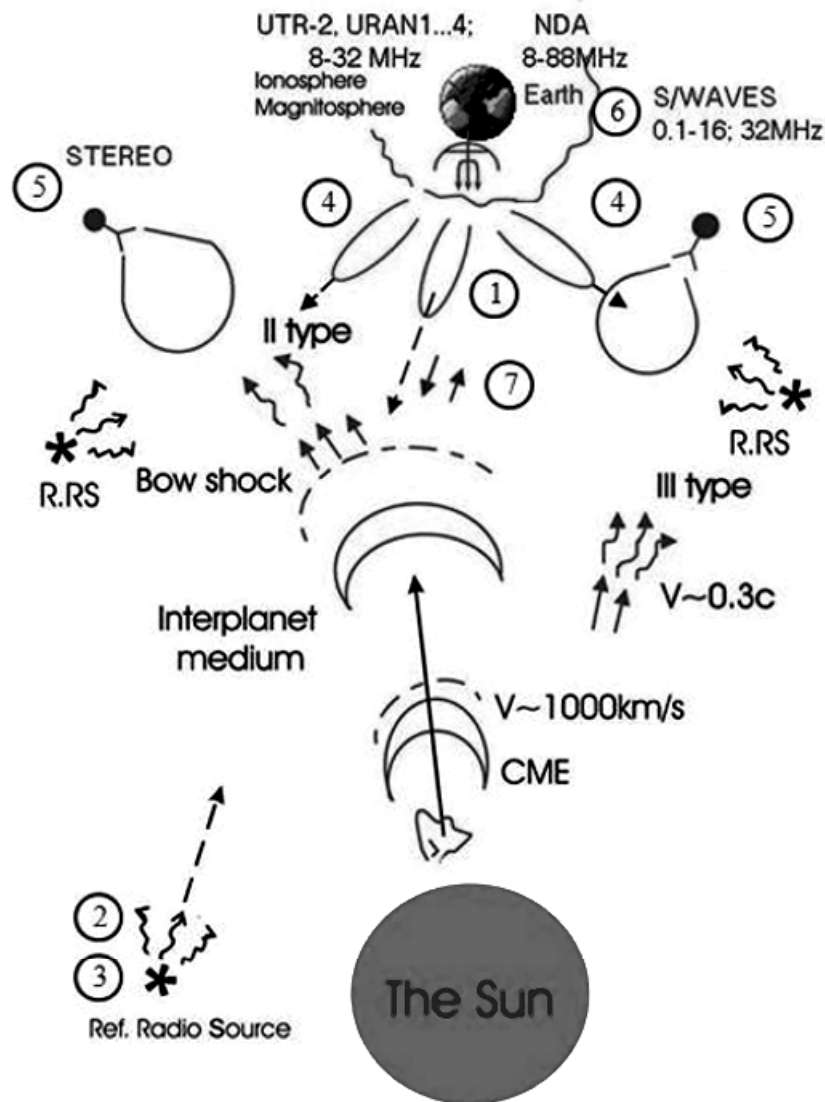


Рис. 19. Дополнительные возможности синхронных наземно-космических экспериментов с помощью УТР-2, УРАН, ГУРТ и миссии STEREO

показал уникальные возможности космических внеатмосферных (внеионосферных) наблюдений космического радиоизлучения именно на предельно низких частотах: в декаметровом – гектометровом диапазонах волн [36]. Это предсказание полностью подтвердилось и ждет своего дальнейшего развития. Состояние современной наземно-космической низкочастотной радиоастрономии впечатляет – имеется несколько десятков высокоэффективных наземных и космических радиотелескопов, разнесенных на расстояния от единиц километров до сотен миллионов километров, связанных в РСДБ-сети либо работающих синхронно (рис. 20).

## 6. Заключение

Более чем 80-летний период существования и развития радиоастрономии показал высокую астрофизическую информативность всех диапазонов широчайшего радиоспектра, включая предельно низкочастотные декаметровый диапазон (наземные наблюдения) и смежный с ними гектометровый (космические миссии). Крупнейшие радиотелескопы декаметровых волн УТР-2 и УРАН постоянно модернизируются, что обеспечивает наилучшие экспериментальные параметры, а наблюдения с их помощью дают уникальную информацию об астрофизических объектах и явлениях.

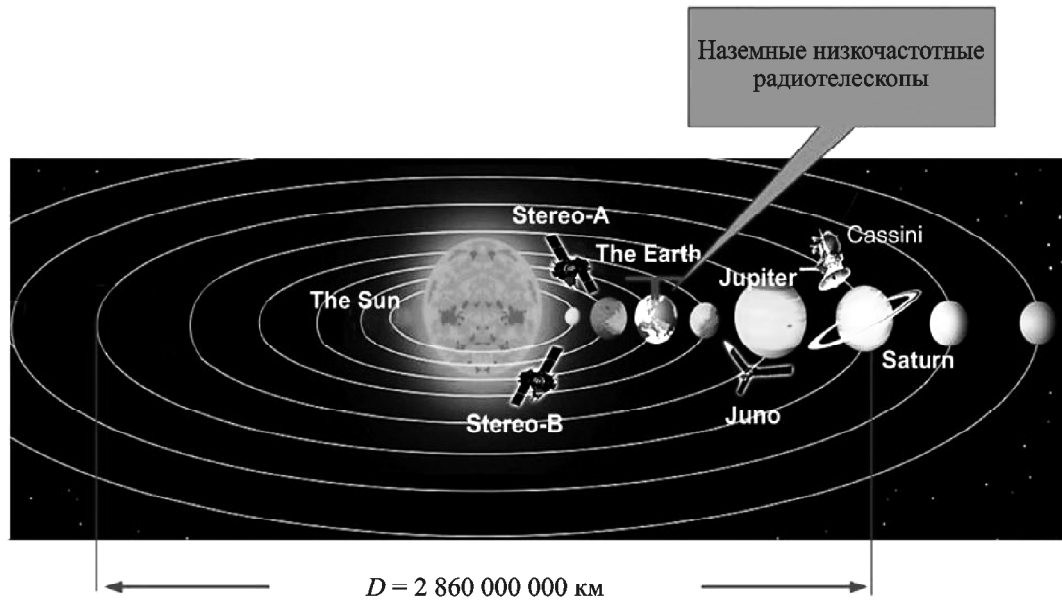


Рис. 20. Схематическое изображение современного состояния наземно-космической низкочастотной радиоастрономии

Бурный прогресс низкочастотной радиоастрономии во всем мире, включая создание и применение инструментов нового поколения LOFAR, LWA, MWA, SKA, NenuFAR, ГУРТ, открывает благоприятные перспективы для исследований. Координированное применение крупнейших высокоэффективных существующих и строящихся наземных радиотелескопов, а также низкочастотных космических миссий обеспечивает впечатляющие возможности будущей низкочастотной радиоастрономии.

Обобщая направления деятельности и результаты И. С. Шкловского, являющиеся основой исследований в области низкочастотной радиоастрономии на протяжении многих десятилетий, необходимо выделить следующие:

- теория горячей солнечной короны, ее спокойное и спорадическое радиоизлучение;
- наблюдение солнечных затмений для изучения солнечной короны;
- радиоспектроскопия Галактики и предсказание линий на высоких и низких частотах;
- интерпретация нетеплового и теплового радиоизлучений;
- применение метода лунных покрытий для изучения тонкой структуры радиоисточников;
- вековое уменьшение плотности потока радиоизлучения остатков сверхновых и его мониторинг;

– перспективы исследований низкочастотного космического радиоизлучения с помощью космических аппаратов;

– экстремальное энерговыделение, нестационарные и эволюционные явления в астрофизике (остатки сверхновых, пульсары, космические мазеры, активные ядра галактик и квазаров, источники гамма-всплесков, реликтовое радиоизлучение);

– написание одних из лучших монографий по всеволновой астрономии и радиоастрономии.

Безусловно, вклад выдающегося астрофизика XX века И. С. Шкловского в низкочастотную радиоастрономию очевиден, востребован и не будет забыт.

Автор выражает благодарность большому коллективу сотрудников Радиоастрономического института НАН Украины и руководству НАН Украины, зарубежным коллегам за участие в описанных исследованиях и их поддержку.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны. – М.: Связь, 1978. – Вып. 26. – С. 3–14.
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 G., 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., Grieffmeier 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. Taylor G. B., Ellingson S. W., Kassim N. E., Craig J., Dowell J., Wolfe C. N., Hartman J., Bernardi G., Clarke T., Cohen A., Dalal N. P., Erickson W. C., Hicks B., Greenhill L. J., Jacoby B., Lane W., Lazio J., Mitchell D., Navarro R., Ord S. M., Pihlstrom Y., Polisensky E., Ray P. S., Rickard L. J., Schinzel F. K., Schmitt H., Stigman E., Soriano M., Stewart K. P., Stovall K., Tremblay S., Wang D., Weiler K. W., White S., and Wood D. L. First Light for the First Station of the Long Wavelength Array // *J. Astron. Instrum.* – 2012. – Vol. 1, No. 1 – P. 1–56. DOI: 10.1142/S2251171712500043
  4. Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковский С. Л., Шарыкин Н. К., Шенелев 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. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН (ч. 1). Основные принципы. Обзор // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 1997. – Т. 2, № 4. – С. 385–401.
  5. Abranin E. P., Bruck Yu. M., Zakharenko V. V., and Konovalenko A. A. The New Preamplification System for the UTR-2 Radio Telescope // *Exp. Astron.* – 2001. – Vol. 11, Is. 2. – P. 85–112. DOI: 10.1023/A:1011109128284
  6. 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 Grieffmeier 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
  7. Melnik V. N., Shevchuk N. V., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Dorovsky V. V., Poedts S., and Lecacheux A. Solar Decameter Spikes // *Sol. Phys.* – 2014. – Vol. 289, Is. 5. – P. 1701–1714. DOI: 10.1007/s11207-013-0434-1
  8. Шкловский И. С. О кинетической температуре верхних слоев солнечной атмосферы // *Астрономический журнал.* – 1946. – Т. 23, № 4. – С. 203–211.
  9. Шкловский И. С. Современное состояние вопроса о природе солнечной короны // *Успехи физических наук.* – 1946. – Т. 30, Вып. 1-2. – С. 63–160.
  10. Шкловский И. С. Из истории развития радиоастрономии в СССР. – М.: Знание, 1982. – 63 с.
  11. Коноваленко О. О., Кошовый В. В., Лозинский А. Б., Станіславський О. О., Шенелев В. О., Івантишин О. Л., Харченко Б. С., Лозинський Р. А., Браженко А. І., Абранін Е. П., Коваль А. О. Спостереження спокійного Сонця на декаметрових радіотелескопах УРАН-2 та УРАН-3 під час сонячного затемнення 1 серпня 2008 р. // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2012. – Т. 17, № 4. – С. 295–300.
  12. Шкловский И. С. Вселенная. Жизнь. Разум. – М.: Изд. АН СССР, 1962. – 450 с.
  13. Farrell W. M., Desch M. D., and Zarka P. On the possibility of coherent cyclotron emission from extrasolar planets // *J. Geophys. Res. Planets.* – 1999. – Vol. 104, Is. E6. – P. 14025–14032. DOI: 10.1029/1998JE900050
  14. Ryabov V. B., Zarka P., Hess S., Konovalenko A., Litvinenko G., Zakharenko V., Shevchenko V. A., and Cecconi B. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions // *Astron. Astrophys.* – 2014. – Vol. 568. – id. A53. DOI:10.1051/0004-6361/201423927
  15. Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Konovalenko A. A., Ulyanov O. M., Serylak M., Zarka P., Grieffmeier J.-M., Cognard I., and Nikolaenko V. S. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2013. – Vol. 431, No. 4. – P. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470
  16. Шкловский И. С. Монохроматическое радиоизлучение галактики и возможность его наблюдения // *Астрономический журнал.* – 1949. – Т. 26, № 1. – С. 10–14.
  17. Шкловский И. С. Радиоспектроскопия Галактики // *Астрономический журнал.* – 1952. – Т. 29, № 2. – С. 144–153.
  18. Шкловский И. С. Космическое радиоизлучение. – М.: Гостехиздат, 1956. – 375 с.
  19. Konovalenko A. A. and Sodin L. G. Neutral  $^{14}\text{N}$  in the interstellar medium // *Nature.* – 1980. – Vol. 283. – P. 360–361. DOI: 10.1038/283360a0
  20. Blake D. H., Crutcher R. M., and Watson W. D. Identification of the anomalous 26.131 MHz nitrogen line observed towards Cas A // *Nature.* – 1980. – Vol. 287. – P. 707–708. DOI: 10.1038/287707a0
  21. Konovalenko A. A. and Sodin L. G. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A // *Nature.* – 1981. – Vol. 294. – P. 135–361. DOI:10.1038/294135a0
  22. Кардашев Н. С. О возможности обнаружения разрешенных линий атомарного водорода в радиодиапазоне // *Астрономический журнал.* – 1959. – Т. 36, № 5. – С. 838–844.
  23. Konovalenko A. A. and Stepkin S. V. Radio Recombination Lines. In: L. I. Gurvits, S. Frey, and S. Rawlings, eds. *Radio Astronomy from Karl Jansky to Microjansky.* – Budapest: EAS Publications Series, 2005. – Vol. 15. – P. 271–295. DOI: 10.1051/eas:2005158

24. Peters W. M., Lazio T. J. W., Clarke T. E., Erickson W. C., and Kassim N. E. Radio recombination lines at decametre wavelengths – Prospects for the future // *Astron. Astrophys.* – 2011. – Vol. 525. – id. A128. DOI: 10.1051/0004-6361/201014707
25. Stepkin S. V., Konovalenko A. A., Kantharia N. G., and Udaya Shankar N. Radio recombination lines from the largest bound atoms in space // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2007. – Vol. 374, Is. 3. – P. 852–856. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.11190.x
26. Krymkin V. V. and Sidorchuk, M. A. Observations of the galactic anticentre region in the direction of PKS0607+17 with the UTR-2 and RATAN-600 radio telescopes // *Astron. Astrophys.* – 1988. – Vol. 200, No. 1-2. – P. 185–190.
27. Konovalenko A. A., Kalinichenko N. N., Rucker H. O., Lecacheux A., Fischer G., Zarka P., Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Griebmeier J.-M., Abranin E. P., Falkovich I. S., Sidorchuk K. M., Kurth W. S., Kaiser M. L., and Gurnett D. A. Earliest recorded ground-based decameter wavelength observations of Saturn’s lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006 // *Icarus.* – 2013. – Vol. 224, No. 1. – P. 14–23. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.07.024
28. Шкловский И. С., Бакулин П. И. Покрытия лунной двух дискретных источников радиоизлучения // *Астрономический журнал.* – 1955. – Т. 32, № 1. – С. 29–32.
29. Van Haarlem M. P., Wise M. W., Gunst A. W., Heald G., McKean J. P., Hessels J. W. T., de Bruyn A. G., Nijboer R., Swinbank J., Fallows R., Brentjens M., Nelles A., Beck R., Falcke H., Fender R., Hörandel J., Koopmans L. V. E., Mann G., Miley G., Röttgering H., Stappers B. W., Wijers R. A. M. J., Zaroubi S., van den Akker M., Alexov A., Anderson J., Anderson K., van Ardenne A., Arts M., Asgekar A., Avruch I. M., Batejat F., Bähren L., Bell M. E., Bell M. R., van Bemmell I., Bennema P., Bentum M. J., Bernardi G., Best P., Birzan L., Bonafede A., Boonstra A.-J., Braun R., Bregman J., Breitling F., van de Brink R. H., Broderick J., Broekema P. C., Brouw W. N., Brügger M., Butcher H. R., van Cappellen W., Ciardi B., Coenen T., Conway J., Coolen A., Corstanje A., Damstra S., Davies O., Deller A. T., Dettmar R.-J., van Diepen G., Dijkstra K., Donker P., Doorduyn A., Dromer J., Drost M., van Duin A., Eislöffel J., van Enst J., Ferrari C., Frieswijk W., Ganekma H., Garrett M. A., de Gasperin F., Gerbers M., de Geus E., Griebmeier J.-M., Grit T., Gruppen P., Hamaker J. P., Hassall T., Hoeft M., Holties H. A., Hornefer A., van der Horst A., van Houwelingen A., Huijgen A., Iacobelli M., Intema H., Jackson N., Jelic V., de Jong A., Jette E., Kant D., Karastergiou A., Koers A., Kollen H., Kondratiev V. I., Kooistra E., Koopman Y., Koster A., Kuniyoshi M., Kramer M., Kuper G., Lambropoulos P., Law C., van Leeuwen J., Lemaitre J., Loose M., Maat P., Macario G., Markoff S., Masters J., McFadden R. A., McKay-Bukowski D., Meijering H., Meulman H., Mevius M., Middelberg E., Millenaar R., Miller-Jones J. C. A., Mohan R. N., Mol J. D., Morawietz J., Morganti R., Mulcahy D. D., Mulder E., Munk H., Nieuwenhuis L., van Nieuwpoort R., Noordam J. E., Norden M., Noutsos A., Offringa A. R., Olofsson H., Omar A., Orrù E., Overeem R., Paas H., Pandey-Pommier M., Pandey V. N., Pizzo R., Polatidis A., Rafferty D., Rawlings S., Reich W., de Reijer J.-P., Reitsma J., Renting G. A., Riemers P., Rol E., Romein J. W., Roosjen J., Ruiter M., Scaife A., van der Schaaf K., Scheers B., Schellart P., Schoenmakers A., Schoonderbeek G., Serylak M., Shulevski A., Sluiman J., Smirnov O., Sobey C., Spreeuw H., Steinmetz M., Sterks C. G. M., Stiepel H.-J., Stuurwold K., Tagger M., Tang Y., Tasse C., Thomas I., Thoudam S., Toribio M. C., van der Tol B., Usov O., van Veelen M., van der Veen A.-J., ter Veen S., Verbiest J. P. W., Vermeulen R., Vermaas N., Vocks C., Vogt C., de Vos M., van der Wal E., van Weeren R., Weggemans H., Weltevrede P., White S., Wijnholds S. J., Wilhelmsson T., Wucknitz O., Yatawatta S., Zarka P., Zensus A., and van Zwieten J. LOFAR: the low-frequency array // *Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 556. – id. 2. DOI: 10.1051/0004-6361/201220873
30. Zarka P., Tagger M., Denis L., Girard J. N., Konovalenko A., Atemkeng M., Arnaud M., Azarian S., Barsuglia M., Bonafede A., Boone F., Bosma A., Boyer R., Branchesi M., Briand C., Cecconi B., Célestin S., Charrier D., Chassande-Mottin E., Coffre A., Cognard I., Combes F., Corbel S., Courte C., Dabbech A., Daiboo S., Dallier R., Dumez-Viou C., El Korso M. N., Falgarone E., Falkovich I., Ferrari A., Ferrari C., Ferrière K., Fevotte C., Fialkov A., Fullekrug M., Gérard E., Griebmeier J.-M., Guiderdoni B., Guillemot L., Hessels J., Koopmans L., Kondratiev V., Lamy L., Lanz T., Larzabal P., Lehnert M., Levrier F., Loh A., Macario G., Maintoux J.-J., Martin L., Mary D., Masson S., Miville-Deschenes M.-A., Oberoi D., Panchenko M., Pandey-Pommier M., Petiteau A., Pinçon J.-L., Revenu B., Rible F., Richard C., Rucker H. O., Salomé P., Semelin B., Serylak M., Sidorchuk M., Smirnov O., Stappers B., Taffoureaux C., Tasse C., Theureau G., Tokarsky P., Torchinsky S., Ulyanov O., van Driel W., Vasylieva I., Vaubailion J., Vazza F., Vergani S., Was M., Weber R., and Zakharenko V. NenuFAR: Instrument description and science case // *International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT): Proc. conf.* – Kharkiv, Ukraine. – 2015. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICATT.2015.7136773
31. Шкловский И. С. О возможном вековом изменении потока и интенсивности радиоизлучения от некоторых дискретных источников // *Астрономический журнал.* – 1960. – Т. 37, № 2. – С. 256–264.
32. Бубнов И. Н., Коноваленко А. А., Станиславский А. А., Бовкун В. П., Жук И. Н., Муха Д. В. Эволюция спектра радиоизлучения остатка вспышки сверхновой Кассиопея А на частотах 35–65 МГц // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 111–119.
33. 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., Калининко 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., Скоролик 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.

34. Zarka P., Farrell W., Fischer G., and Konovalenko A. Ground-based and space-based radio observations of planetary lightning // *Space Sci. Rev.* – 2008. – Vol. 137, Is. 1. – P. 257–269. DOI: 10.1007/s11214-008-9366-8
35. Konovalenko A. A., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., Lecacheux A., Mann G., Bougeret, J.-L., Kaiser M. L., Briand C., Zarka P., Abranin E. P., Dorovsky V. V., Koval A. A., Mel'nik V. N., Mukha D. V., and Panchenko M. Synchronized observations by using the STEREO and the largest ground based decameter radio telescope // *Exp. Astron.* – 2013. – Vol. 36. – P. 137–154. DOI: 10.1007/s10686-012-9326-x
36. Гетманцев Г. Г., Гинзбург В. Л., Шкловский И. С. Радиоастрономические исследования с помощью искусственных спутников Земли // *Успехи физических наук.* – 1958. – Т. 66, Вып. 2. – С. 157–161.
- ### REFERENCES
- BRAUDE, S. Y., MEGN, A. V. and SODIN, L. G., 1978. Decameter wave band radio telescope UTR-2. In: *Anteny*. Moscow, USSR: Svyaz'. no. 26, pp. 3–15 (in Russian).
  - KONOVALENKO, A., SODIN, L., ZAKHARENKO, V., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEP-KIN, 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., 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., RYABOV, V., REZNICHENKO, 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
  - TAYLOR, G. B., ELLINGSON, S. W., KASSIM, N. E., CRAIG, J., DOWELL, J., WOLFE, C. N., HARTMAN, J., BERNARDI, G., CLARKE, T., COHEN, A., DALAL, N. P., ERICKSON, W. C., HICKS, B., GREENHILL, L. J., JACOBY, B., LANE, W., LAZIO, J., MITCHELL, D., NAVARRO, R., ORD, S. M., PIHLSTROM, Y., POLISENSKY, E., RAY, P. S., RICKARD, L. J., SCHINZEL, F. K., SCHMITT, H., SIGMAN, E., SORIANO, M., STEWART, K. P., STOVALL, K., TREMBLAY, S., WANG, D., WEILER, K. W., WHITE, S. and WOOD, D. L., 2012. First Light for the First Station of the Long Wavelength Array. *J. Astron. Instrum.* vol. 1, no. 1, pp. 1–56. DOI: 10.1142/S2251171712500043
  - MEGN, A. V., BRAUDE, S. Y., RASHKOVSKIY, S. L., SHARYKIN, N. K., SHEPELEV, V. A., INUTIN, G. A., KHRISTENKO, A. D., BULATSEN, V. G., BRAZHENKO, A. I., KOSHOVYY, V. V., ROMANCHEV, Y. V., THESEVICH, V. P. and GALANIN, V. P., 1997. URAN System of the Decametric Interferometers (I). *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 2, no. 4, pp. 385–401 (in Russian).
  - ABRANIN, E. P., BRUCK, YU. M., ZAKHARENKO, V. V. and KONOVALENKO, A. A., 2001. The New Preamplification System for the UTR-2 Radio Telescope. *Exp. Astron.* vol. 11, is. 2, pp. 85–112. DOI: 10.1023/A:1011109128284
  - ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEP-KIN, 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., VASYLKIVSKIY, 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., 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
  - MELNIK, V. N., SHEVCHUK, N. V., KONOVALENKO, A. A., RUCKER, H. O., DOROVSKYY, V. V., POEDTS, S. and LECACHEUX, A., 2014. Solar Decameter Spikes. *Sol. Phys.* vol. 289, no. 5, pp. 1701–1714. DOI: 10.1007/s11207-013-0434-1
  - SHKLOVSKII, I. S., 1946. About kinetic temperature of solar atmosphere upper layers. *Astronomicheskii zhurnal*. vol. 23, no. 4, pp. 203–211 (in Russian).
  - SHKLOVSKII, I. S., 1946. Modern state of solar corona nature problem. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. vol. 30, is. 1-2, P. 63–160 (in Russian).
  - SHKLOVSKII, I. S., 1982. *From the history of radio astronomy progress in USSR*. Moscow, USSR: Znanie Publ. (in Russian).
  - KONOVALENKO, A. A., KOSHOVYY, V. V., LOZYNSKYY, A. B., STANISLAVSKY, A. A., SHEPELEV, V. A., IVANTYSHYN, O. L., KHARCHENKO, B. S., LOZYNSKYY, R. A., BRAZHENKO, A. I., ABRANIN, E. P. and KOVAL, A. A., 2012. Quiet Sun Observations by URAN-2 and URAN-3 Decameter Radio Telescopes during the Solar Eclipse of August 1, 2008. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 17, no. 4, pp. 295–300 (in Ukrainian).
  - SHKLOVSKII, I. S., 1982. *Universe. Life. Mind*. Moscow, USSR: AS USSR Publ. (in Russian).
  - FARRELL, W. M., DESCH, M. D. and ZARKA, P., 1999. On the possibility of coherent cyclotron emission from extrasolar planets. *J. Geophys. Res. Planets*. vol. 104, is. E6, pp. 14025–14032. DOI: 10.1029/1998JE900050
  - RYABOV, V. B., ZARKA, P., HESS, S., KONOVALENKO, A., LITVINENKO, G., ZAKHARENKO, V.,

- SHEVCHENKO, V. A. and CECCONI, B., 2014. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions. *Astron. Astrophys.* vol. 568, id. A53. DOI:10.1051/0004-6361/201423927
15. ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., KONOVALENKO, A. A., ULYANOV, O. M., SERYLAK, M., ZARKA, P., GRIEBMEIER, J.-M., COGNARD, I. and NIKOLAENKO, V. S., 2013. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 431, no. 4, pp. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470
  16. SHKLOVKII, I. S., 1949. Monochromatic radio emission from the galaxy and the possibility of its observation. *Astronomicheskii zhurnal.* vol. 26, no. 1, pp. 10–14 (in Russian).
  17. SHKLOVKII, I. S., 1952. Radio spectroscopy of the Galaxy. *Astronomicheskii zhurnal.* vol. 29, no. 2, pp. 144–153 (in Russian).
  18. SHKLOVKII, I. S., 1956. Cosmic radio emission. Moscow, USSR: Gostekhizdat Publ. (in Russian).
  19. KONOVALENKO, A. A. and SODIN, L. G., 1980. Neutral  $^{14}\text{N}$  in the interstellar medium. *Nature.* vol. 283, pp. 360–361. DOI:10.1038/283360a0
  20. BLAKE, D. H., CRUTCHER, R. M. and WATSON, W. D., 1980. Identification of the anomalous 26.131 MHz nitrogen line observed towards Cas A. *Nature.* vol. 287, pp. 707–708. DOI: 10.1038/287707a0
  21. KONOVALENKO, A. A. and SODIN, L. G., 1981. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A. *Nature.* vol. 294, pp. 135–361. DOI:10.1038/294135a0
  22. KARDASHEV, N. S., 1959. On the Possibility of Detection of Allowed Lines of Atomic Hydrogen in the Radio-Frequency Spectrum. *Astronomicheskii zhurnal.* vol. 36, no. 5, pp. 838–844 (in Russian).
  23. KONOVALENKO, A. A. and STEPKIN, S. V., 2005. Radio Recombination Lines, In: L. I. GURVITS, S. FREY and S. RAWLINGS, eds. *Radio Astronomy from Karl Jansky to Microjansky.* Budapest: EAS Publications Series. vol. 15, pp. 271–295. DOI: 10.1051/eas:2005158
  24. PETERS, W. M., LAZIO, T. J. W., CLARKE, T. E., ERICKSON, W. C. and KASSIM, N. E., 2011. Radio recombination lines at decametre wavelengths – Prospects for the future. *Astron. Astrophys.* vol. 525, id. A128. DOI: 10.1051/0004-6361/201014707
  25. STEPKIN, S. V., KONOVALENKO, A. A., KANTHARIA, N. G. and UDAYA SHANKAR, N., 2007. Radio recombination lines from the largest bound atoms in space. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 374, is. 3, pp. 852–856. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.11190.x
  26. KRYMKIN, V. V. and SIDORCHUK, M. A., 1988. Observation of the galactic anticentre region in the direction of PKS0607+17 with the UTR-2 and RATAN-600 radio telescopes. *Astron. Astrophys.* vol. 200, no, 1-2, pp. 185–190.
  27. KONOVALENKO, A. A., KALINICHENKO, N. N., RUCKER, H. O., LECACHEUX, A., FISCHER, G., ZARKA, P., ZAKHARENKO, V. V., MYLOSTNA, K. Y., GRIEBMEIER, J.-M., ABRANIN, E. P., FALKOVICH, I. S., SIDORCHUK, K. M., KURTH, W. S., KAISER, M. L. and GURNETT, D. A., 2013. Earliest recorded ground-based decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006. *Icarus.* vol. 224, no. 1, pp. 14–23. DOI:10.1016/j.icarus.2012.07.024
  28. SHKLOVKII, I. S. and BAKULIN, P. I., 1955. Moon coverages of two discrete sources of radio emission. *Astronomicheskii zhurnal.* vol. 32, no. 1, pp. 29–32 (in Russian).
  29. VAN HAARLEM, M. P., WISE, M. W., GUNST, A. W., HEALD, G., MCKEAN, J. P., HESSELS, J. W. T., DE BRUYN, A. G., NIJBOER, R., SWINBANK, J., FALLOWS, R., BRENTJENS, M., NELLES, A., BECK, R., FALCKE, H., FENDER, R., HÖRANDEL, J., KOOPMANS, L. V. E., MANN, G., MILEY, G., RÖTTGERING, H., STAPPERS, B. W., WIJERS, R. A. M. J., ZAROUBI, S., VAN DEN AKKER, M., ALEXOV, A., ANDERSON, J., ANDERSON, K., VAN ARDENNE, A., ARTS, M., ASGEKAR, A., AVRUCH, I. M., BATEJAT, F., BÄHREN, L., BELL, M. E., BELL, M. R., VAN BEMMEL, I., BENNEMA, P., BENTUM, M. J., BERNARDI, G., BEST, P., BÎRZAN, L., BONAFEDÉ, A., BOONSTRA, A.-J., BRAUN, R., BREGMAN, J., BREITLING, F., VAN DE BRINK, R. H., BRODERICK, J., BROEKEMA, P. C., BROUW, W. N., BRÜGGEN, M., BUTCHER, H. R., VAN CAPPELLEN, W., CIARDI, B., COENEN, T., CONWAY, J., COOLEN, A., CORSTANJE, A., DAMSTRA, S., DAVIES, O., DELLER, A. T., DETTMAR, R.-J., VAN DIEPEN, G., DIJKSTRA, K., DONKER, P., DOORDUIN, A., DROMER, J., DROST, M., VAN DUIN, A., EISLÖFFEL, J., VAN ENST, J., FERRARI, C., FRIESWIJK, W., GANKEMA, H., GARRETT, M. A., DE GASPERIN, F., GERBERS, M., DE GEUS, E., GRIEBMEIER, J.-M., GRIT, T., GRUPPEN, P., HAMAKER, J. P., HASSALL, T., HOEFT, M., HOLTIES, H. A., HORNEFFER, A., VAN DER HORST, A., VAN HOUWELINGEN, A., HUIJGEN, A., IACOBELLI, M., INTEMA, H., JACKSON, N., JELIC, V., DE JONG, A., JUETTE, E., KANT, D., KARASTERGIOU, A., KOERS, A., KOLLEN, H., KONDRATIEV, V. I., KOOISTRA, E., KOOPMAN, Y., KOSTER, A., KUNIYOSHI, M., KRAMER, M., KUPER, G., LAMBROPOULOS, P., LAW, C., VAN LEEUWEN, J., LEMAITRE, J., LOOSE, M., MAAT, P., MACARIO, G., MARKOFF, S., MASTERS, J., MCFADDEN, R. A., MCKAY-BUKOWSKI, D., MEIJERING, H., MEULMAN, H., MEVIUS, M., MIDDELBERG, E., MILLENAAR, R., MILLER-JONES, J. C. A., MOHAN, R. N., MOL, J. D., MORAWIETZ, J., MORGANTI, R., MULCAHY, D. D., MULDER, E., MUNK, H., NIEUWENHUIS, L., VAN NIEUWPOORT, R., NOORDAM, J. E., NORDEN, M., NOUTSOS, A., OFFRINGA, A. R., OLOFSSON, H., OMAR, A., ORRÚ, E., OVEREEM, R., PAAS, H., PANDEY-POMMIER, M., PANDEY, V. N., PIZZO, R., POLATIDIS, A., RAFFERTY, D., RAWLINGS, S., REICH, W., DE REIJER, J.-P., REITSMA, J., RENTING, G. A., RIEMERSV, P., ROL, E., ROMEIN, J. W., ROOSJEN, J., RUITER, M., SCAIFE, A., VAN DER SCHAAF, K., SCHEERS, B., SCHELLARTV, P., SCHOENMAKERS, A., SCHOONDERBEEK, G., SERYLAK, M., SHULEVSKI, A., SLUMAN, J., SMIRNOV, O., SOBEY, C., SPREEUW, H., STEINMETZ, M., STERKS, C. G. M., STIEPEL, H.-J.,

- STUURWOLD, K., TAGGER, M., TANG, Y., TASSE, C., THOMAS, I., THOUDAM, S., TORIBIO, M. C., VAN DER TOL, B., USOV, O., VAN VEELEN, M., VAN DER VEEN, A.-J., TER VEEN, S., VERBIEST, J. P. W., VERMEULEN, R., VERMAAS, N., VOCKS, C., VOGT, C., DE VOS, M., VAN DER WAL, E., VAN WEEREN, R., WEGGEMANS, H., WELTEVREDE, P., WHITE, S., WIJNHOLDS, S. J., WILHELMSSON, T., WUCKNITZ, O., YATAWATTA, S., ZARKA, P., ZENSUS, A. and VAN ZWIETEN, J., 2013. LOFAR: the low-frequency array. *Astron. Astrophys.* vol. 556, id. 2. DOI: 10.1051/0004-6361/201220873
30. ZARKA, P., TAGGER, M., DENIS, L., GIRARD, J. N., KONOVALENKO, A., ATEMKENG, M., ARNAUD, M., AZARIAN, S., BARSUGLIA, M., BONAFEDE, A., BOONE, F., BOSMA, A., BOYER, R., BRANCHESI, M., BRIAND, C., CECCONI, B., CÉLESTIN, S., CHARRIER, D., CHASSANDE-MOTTIN, E., COFFRE, A., COGNARD, I., COMBES, F., CORBEL, S., COURTE, C., DABBECH, A., DAIBOO, S., DALLIER, R., DUMEZVIOU, C., KORSO, M. N. E., FALGARONE, E., FALKOVYCH, I., FERRARI, A., FERRARI, C., FERRIÈRE, K., FEVOTTE, C., FIALKOV, A., FULLEKRUG, M., GÉRARD, E., GRIEBMEIER, J.-M., GUIDERDONI, B., GUILLEMOT, L., HESSELS, J., KOOPMANS, L., KONDRATIEV, V., LAMY, L., LANZ, T., LARZABAL, P., LEHNERT, M., LEVRIER, F., LOH, A., MACARIO, G., MAINTOUX, J. J., MARTIN, L., MARY, D., MASSON, S., MIVILLE-DESCHENES, M. A., OBEROI, D., PANCHENKO, M., PANDEY-POMMIER, M., PETITTEAU, A., PINÇON, J. L., REVENU, B., RIBLE, F., RICHARD, C., RUCKER, H. O., SALOMÉ, P., SEMELIN, B., SERYLAK, M., SMIRNOV, O., STAPPERS, B., TAFFOUREAU, C., TASSE, C., THEUREAU, G., TOKARSKY, P., TORCHINSKY, S., ULYANOV, O., VAN DRIEL, W., VASYLIEVA, I., VAUBAILLON, J., VAZZA, F., VERGANI, S., WAS, M., WEBER, R. and ZAKHARENKO, V., 2015. NenuFAR: Instrument description and science case. In: *International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT): Proc. conf.* Kharkiv, Ukraine, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICATT.2015.7136773
31. SHKLOVSKII, I. S., 1960. Secular Variation of the Flux and Intensity of Radio Emission from Discrete Sources. *Astronomicheskii zhurnal*. vol. 37, no. 2, pp. 256–264 (in Russian).
32. BUBNOV, I. N., KONOVALENKO, A. A., STANISLAVSKY, A. A., BOVKOON, V. P., ZHOUK, I. N. and MUKHA, D. V., 2014. Radio Spectrum Evolution of the Supernova Remnant Cassiopeia A at Frequencies 35–65 MHz. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 19, no. 2, pp. 111–119 (in Russian).
33. 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., KHRISTENKO, A. D., MUKHA, D. V., REZNICHENKO, 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).
34. ZARKA, P., FARRELL, W., FISCHER, G. and KONOVALENKO, A., 2008. Ground-based and space-based radio observations of planetary lightning. *Space Sci. Rev.* vol. 137, is. 1, pp. 257–269. DOI: 10.1007/s11214-008-9366-8
35. KONOVALENKO, A. A., STANISLAVSKY, A. A., RUCKER, H. O., LECACHEUX, A., MANN, G., BOUGERET, J.-L., KAISER, M. L., BRIAND, C., ZARKA, P., ABRANIN, E. P., DOROVSKY, V. V., KOVAL, A. A., MEL'NIK, V. N., MUKHA, D. V. and PANCHENKO, M., 2013. Synchronized observations by using the STEREO and the largest ground based decameter radio telescope. *Exp. Astron.* vol. 36, pp. 137–154. DOI: 10.1007/s10686-012-9326-x
36. GETMANTSEV, G. G., GINZBURG, V. L. and SHKLOVSKII, I. S., 1958. Radio astronomical investigations with the aid of artificial satellites. *Sov. Phys. Usp.* vol. 1, is. 1, pp. 65–67. DOI: 10.1070/PU1958v001n01ABEH003084

A. A. Konovalenko

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

#### I. S. SHKLOVSKY AND LOW-FREQUENCY RADIO ASTRONOMY

*Purpose:* Proving of the high astrophysical significance of the low-frequency radio astronomy (decameter and adjacent hectometer and meter wavelengths), demonstration of the priority results of the Ukrainian low-frequency radio astronomy as well as significant contribution of I. S. Shklovsky to its development.

*Design/methodology/approach:* The requirements to characteristics of high efficiency radio telescopes UTR-2, URAN, GURT and to sensitive and interference immune observational methods at low frequencies are formulated by using the theoretical analysis and astrophysical predictions including those I. S. Shklovsky's.

*Findings:* New generation radio telescopes UTR-2, URAN, GURT are created and modernized. New observational methods at low frequencies are introduced. Large-scale investigations of the Solar system, Galaxy and Methagalaxy are carried out. They have allowed to detect new objects and phenomena for the continuum, monochromatic, pulse and sporadic cosmic radio emission. The role of I. S. Shklovsky in the development of many low-frequency radio astronomy directions is noted, too.

*Conclusions:* The unique possibilities of the low-frequency radio astronomy which gives new information about the Universe, inaccessible with the other astrophysical methods, are shown. The progress of the low-frequency radio astronomy opens the impressive possibilities for the future. It includes modernization

of the largest radio telescopes UTR-2, URAN, NDA and creation of new instruments GURT, NenuFAR, LOFAR, LWA, MWA, SKA as well as making multi-antenna and ground-space experiments. The contribution of outstanding astrophysicist of the XX century I. S. Shklovsky to this part of actual astronomical science is evident, claiming for attention and will never be forgotten.

*Key words:* low-frequency radio astronomy, radio telescope, recording equipment, Solar system, Galaxy, Methagalaxy

*О. О. Коноваленко*

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

### І. С. ШКЛОВСЬКИЙ ТА НИЗЬКОЧАСТОТНА РАДІОАСТРОНОМІЯ

*Предмет і мета роботи:* доведення високої астрофізичної значущості низькочастотної радіоастрономії (декаметровий і суміжні з ним гектометровий та метровий діапазони хвиль), демонстрація пріоритетних результатів української низькочастотної радіоастрономії і значного внеску І. С. Шкловського у її розвиток.

*Методи і методологія:* На основі теоретичного аналізу та астрофізичних передбачень, включаючи ті, що зроблені І. С. Шкловським, сформульовано вимоги до характеристик високоефективних радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ

і методів високочутливих завадостійких спостережень на низьких частотах.

*Результати:* Створено та модернізовано радіотелескопи нового покоління УТР-2, УРАН, ГУРТ, впроваджено нові методи спостережень на низьких частотах. Виконано широкомасштабні дослідження Сонячної системи, Галактики та Метагалактики, що дозволили зареєструвати нові об'єкти та явища у континуальному, монохроматичному, імпульсному, спорадичному космічному радіовипромінюванні. Відзначено роль І. С. Шкловського у розвитку багатьох напрямків низькочастотної радіоастрономії.

*Висновок:* Показано унікальні можливості низькочастотної радіоастрономії, що надає інформацію про Всесвіт, недоступну іншим методам астрофізики. Прогрес низькочастотної радіоастрономії, включаючи модернізацію найбільших радіотелескопів УТР-2, УРАН, NDA, створення інструментів нового покоління ГУРТ, NenuFAR, LOFAR, LWA, MWA, SKA, виконання багатоантенних та наземно-космічних експериментів, відкриває вражаючі можливості майбутньої низькочастотної радіоастрономії. Внесок видатного астрофізика XX сторіччя І. С. Шкловського є очевидним, затребуваним і не буде забутим.

*Ключові слова:* низькочастотна радіоастрономія, радіотелескоп, реєструюча апаратура, Сонячна система, Галактика, Метагалактика

*Статья поступила в редакцию 09.02.2017*