

УДК 520.272.22

О возможности наблюдений солнечных субтерагерцовых вспышек на радиотелескопе РАТАН-600

В.Б. Хайжин¹, Г.А. Макоев¹, В.В. Смирнова²

¹ Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН, Пулковское ш., 65, Санкт-Петербург, 196140, Россия

vkhstu@mail.ru

² ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», Научный, 298409, Крым

v_vsvid.smirnova@yandex.ru

Поступила в редакцию 18 октября 2023 г.

Аннотация. Предложен метод наблюдений солнечных субтерагерцовых вспышек (СТВ) на радиотелескопе РАТАН-600 в диапазоне 1–100 ГГц. Наблюдения СТВ предлагается проводить в процессе штатных многоазимутальных наблюдений Солнца с сокращенной апертурой на частоте 93 ГГц.

Рассчитаны ожидаемые диаграммы направленности антенной системы на частотах 30, 93 и 140 ГГц (10, 3 и 2 мм) с учетом возможных ошибок поверхности элементов, ошибок их взаимной привязки, а также выноса первичного облучателя из фокуса. Получены их двумерные свертки с моделью Солнца, одномерные сканы которых соответствуют ожидаемым радиоизображениям Солнца на РАТАН-600 на указанных частотах. Оценены ожидаемые потоки СТВ в соответствии с моделью, согласно которой субтерагерцовое излучение генерируется за счет теплового тормозного механизма оптически толстой плазмы хромосферы и переходной области Солнца.

Предложено проведение совместных наблюдений СТВ на РАТАН-600 в диапазоне 1–100 ГГц и на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана на частотах 93 и 140 ГГц. Это позволит уточнить W-образную форму спектра СТВ в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, прояснить природу субтерагерцового излучения солнечных вспышек с положительным наклоном спектра.

Ключевые слова: радиотелескоп, солнечная активность, субтерагерцовые вспышки

1 Введение

Спектр плотности потока радиоизлучения солнечных вспышек в сантиметровом (СМ) диапазоне длин волн обычно имеет положительный наклон в низкочастотной и отрицательный наклон в высокочастотной части (Kundu, Vlahos, 1982). Одним из механизмов, генерирующих СМ-излучение солнечных вспышек, является гиротронный механизм. Форма гиротронного спектра по данным в СМ-диапазоне позволяет определить области оптически тонкого и оптически толстого излучения, расположенные по разные стороны от спектрального максимума. Положительный наклон гиротронного спектра в низкочастотной области определяется поглощением, приводящим к снижению интенсивности спектра с уменьшением частоты, а отрицательный наклон спектра в высокочастотной области подчиняется степенному закону и определяется распределением энергии ускоренных электронов (Куприянова и др., 2020). Такой вид спектра описывает поведение ускоренных частиц в магнитном поле, появляющихся во время вспышки и распространяющихся из солнечной короны вниз, где они тормозятся в плотных слоях солнечной атмосферы. При этом происходит испарение хромосферной плазмы после импульсной фазы вспышки и наблюдается усиление субтерагерцового (суб-ТГц) излучения.

Одним из вызовов солнечной астрофизике XXI века стала потребность объяснения интенсивного излучения солнечных вспышек в суб-ТГц диапазоне длин волн (0.1–1 ТГц) с положительным наклоном спектра (Степанов, 2019), впервые обнаруженного на частоте 250 ГГц (Clark, Park, 1968).

На данный момент предложено множество моделей, описывающих положительный спектр СТВ, но ни одна из них полностью не удовлетворяет результатам наблюдений (Tsap et al., 2016).

Наибольший инструментальный вклад в обнаружение и изучение СТВ внесли Солнечный субмиллиметровый телескоп (SST) диаметром 1.5 м, расположенный в Аргентинских Андах на высоте 2550 м (Kaufmann et al., 2000), и субмиллиметровый телескоп KOSMA диаметром 3 м, расположенный в Швейцарских Альпах на высоте 3135 м (Lüthi et al., 2004). В Российской Федерации СТВ регулярно наблюдают на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана на частотах 93 и 140 ГГц с пространственным разрешением 2.5 и 1.5 угл. мин соответственно (Tsap et al., 2018).

В настоящее время предполагается, что СТВ могут иметь как тепловую, так и нетепловую природу (Krucker et al., 2013). Источниками теплового суб-ТГц излучения вспышек с положительным наклоном спектра ($\alpha = 0.5-3.4$) могут являться вспыхивающие ленты площадью ~ 1000 (угл. сек)², хорошо видимые в крайнем ультрафиолетовом диапазоне (Kontar et al., 2018). В данной работе авторы предположили, что суб-ТГц излучение генерируется за счет теплового тормозного механизма (свободно-свободное излучение) оптически толстой плазмы, расположенной в хромосфере и переходной области, которая нагревается нетепловыми электронами или ионами. В результате вспышечного нагрева хромосферы плазма испаряется и заполняет петли, где излучение становится оптически толстым. При этом плазма в диапазоне температур 0.1–1 МК дает усиленное суб-ТГц излучение. Однако такая интерпретация предполагает появление субтерагерцового эффекта Нойперта, который наблюдается далеко не во всех вспышках (Smirnova et al., 2021). К тому же источники суб-ТГц и крайнего ультрафиолетового излучения вспышки не всегда совпадают, что показано, например, в работе Skokić et al. (2023). Кроме того, тепловой механизм излучения СТВ не объясняет пульсации в профилях суб-ТГц излучения с периодом от 0.2 до 4 сек при длительности вспышки от 2 до 10 мин, а также W-образную форму спектра (Степанов, 2019).

С другой стороны, предполагается, что источники СТВ нетепловой природы должны быть компактными (Kaufmann et al., 2009). Для нетеплового механизма излучения СТВ нужны аномально высокие магнитные поля (выше 3000 Гс), прогрев хромосферы Солнца до корональных температур 10^6-10^{10} К, ускорение электронов до энергий ~ 1 МэВ. Современные нетепловые модели вспышечного процесса предполагают, что максимум вспышек в диапазоне больше 100 ГГц формируется за счет гиротронного механизма излучения (Fleishman, Kontar, 2017). Ускорение электронов может также происходить в хромосфере в индукционных электрических полях вследствие неустойчивости Рэлея–Тейлора (Zaitsev, Stepanov, 2015), обеспечивая нагрев этой области хромосферы до температуры $\approx 10^6-10^8$ К и появление усиленного суб-ТГц излучения вспышек. Однако при этом нужно ожидать совпадение временных профилей суб-ТГц, микроволнового и рентгеновского излучения в импульсной фазе вспышки, что наблюдается не всегда (Smirnova et al., 2021).

Возможно, механизм излучения СТВ носит комбинированный характер, что включает как магнито-тормозное излучение оптически толстых протяженных вспышечных лент, так и нетепловое излучение компактных областей, находящихся в аномальных для хромосферы условиях. Для уточнения природы СТВ недостаточно имеющихся в распоряжении наблюдательных данных, поэтому необходимы новые многоволновые наблюдения вспышек, чтобы как можно лучше заполнить W-образную форму спектра СТВ.

Цель представленной работы – изучить возможность наблюдений СТВ на радиотелескопе РАТАН-600.

2 О возможности наблюдения СТВ на РАТАН-600

Метод сопровождения Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 с сокращенной до 100–120 м апертурой был предложен и впервые испытан в работе Khaikin et al. (2000). В современной многоазимутальной модификации метод позволяет сопровождать Солнце облучателем и сканировать кареткой в течение 8–12 минут в каждом из 16–20 азимутов антенной системы (АС) “Юг+Плоский” с интервалом 4° и максимальной продолжительностью наблюдений Солнца в течение 4–5 часов в день (Хайкин и др., 2018). При этом реализована достаточно высокая точность движения облучателя тип 3 и его каретки после модернизации антенной системы управления (АСУ) (Стороженко и др., 2021). В дальнейшем планируется дооснастить АСУ высокоточной инерциальной навигационной системой с двумя разнесенными антеннами глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) разра-

ботки Лаборатории микроприборов (Зеленоград), что обеспечит автономную обратную связь АСУ облучателя по угловой скорости и положению (Хайкин и др., 2023).

Инструментальная возможность наблюдений СТВ на РАТАН-600 рассмотрена в работе Хайкин и др. (2023). Для наблюдений СТВ в миллиметровом (ММ) диапазоне длин волн предлагается использовать сильно сокращенную апертуру радиотелескопа, облучая одну группу элементов (25 щитов) сектора, состоящего из 7 групп щитов. Оптимальными для наблюдений СТВ в ММ-диапазоне на радиотелескопе РАТАН-600 являются длины волн 10 и 3 мм, при том что радиотелескоп работает в штатном режиме с удовлетворительной антенной эффективностью до длины волны 10 мм.

Важную роль в наблюдениях СТВ играет учет поглощения ММ-сигнала в земной атмосфере.

Радиопрозрачность атмосферы в ММ-диапазоне длин волн определяется содержанием водяного пара, капельной водой облаков, а также кислородом. Вклад кислорода вдали от линий поглощения кислорода менее существенный и поддается расчету с учетом высоты места и приземного давления. Для эффективных наблюдений в коротком ММ-диапазоне требуется мониторинг радиопрозрачности или оптической толщины атмосферы. В работе Хайкин (2023) предложен радиометрический способ измерения оптической толщины атмосферы в процессе сопровождения Солнца на РАТАН-600 на длинах волн 3 и 2 мм. Оптическая толщина ясной атмосферы прямо пропорциональна влагосодержанию атмосферы, а облачной атмосферы прямо пропорциональна водозапасу облаков. Коэффициентами пропорциональности этих вкладов являются удельные коэффициенты поглощения в парах воды и капельной воде, зависящие от длины волны, сезона и высоты места (Bubnov et al., 2020).

Заметим, что среднесуточное значение поглощения атмосферы в диапазоне 2–3 мм в хороших погодных условиях (нет дождя, тумана, снега и грозовой облачности) составляет обычно не более 0.1/0.2 непера (Нп) даже на равнине, что уменьшает поток от Солнца не более чем на 10–25%. Для данной задачи важнее кратковременные вариации атмосферного поглощения, которые могут ослаблять поток от Солнца на 40–50%, в частности из-за облаков или изменений влагосодержания атмосферы. Поэтому необходим мониторинг влагосодержания атмосферы и облачности для наблюдений СТВ, поскольку медленные и быстрые изменения поглощения атмосферы варьируются от секунд до минут и их в ряде случаев трудно отличить от изменений потока от Солнца.

Для мониторинга влагосодержания атмосферы было предложено применять метод ГНСС, описанный в работе Шиховцев и др. (2022). В данном методе оценка влагосодержания атмосферы получается при вычислении задержки распространения сигнала от спутника к приемнику, обусловленной тропосферной рефракцией. Для мониторинга влагосодержания атмосферы и облачности на РАТАН-600 установлена приемная станция ГНСС, а также метеостанция с солнечным фотометром (пиранометром).

Ранее, в 90-е годы XX века, на РАТАН-600 были получены единичные наблюдения Солнца на длине волны 3.2 мм, которые проводились в основном с методической целью для оценки качества взаимной привязки элементов антенны по фронтам Солнца и отражающей поверхности по рассеянному фону неба (Госачинский и др., 1989). Изучение исторических записей кривых прохождения Солнца, сделанных на самописце с временными (минутными) метками при помощи отдельных щитов РАТАН-600 в 1987 г. для изучения качества их отражающей поверхности, показывает, что активные области (АО) на Солнце на длине волны 3.2 мм могут выделяться этими щитами и наблюдаться в течение нескольких дней (рис. 1). Принципиальная возможность наблюдений на РАТАН-600 на длине волны 2 мм, с точки зрения влияния систематических и случайных ошибок, показана в работе Майорова (1987) с рекомендацией облучения в этом диапазоне только центральной части щитов. Однако это потребует проведения новых работ по улучшению качества отражающей поверхности щитов, аналогичных тем, что были предприняты ранее, в 90-е годы XX века.

Наблюдения СТВ предлагается проводить в процессе штатных многоазимутальных наблюдений Солнца в СМ-диапазоне на АС “Юг+Плоский” РАТАН-600 в режиме прохождения с полной апертурой на длине волны 10 мм и сокращенной апертурой (50 м) на длине волны 3 мм. Также предполагаются периодические наблюдения в режиме сопровождения Солнца с сокращенной апертурой 100 × 5 м на длине волны 10 мм и 50 × 2 м на длине волны 3 мм. Для этого предложено использовать конические рупора с полушириной диаграммы направленности (ДН), равной 7° на длине волны 3 мм, разработанные ООО “МВЭЙВ” (Хайкин и др., 2023). При этом эффективный горизонтальный размер апертуры составит ~ 50 м, что обеспечит достаточно высокое пространственное разрешение АО на Солнце и существенно упростит работу инструмента в столь коротком диапазоне длин волн.

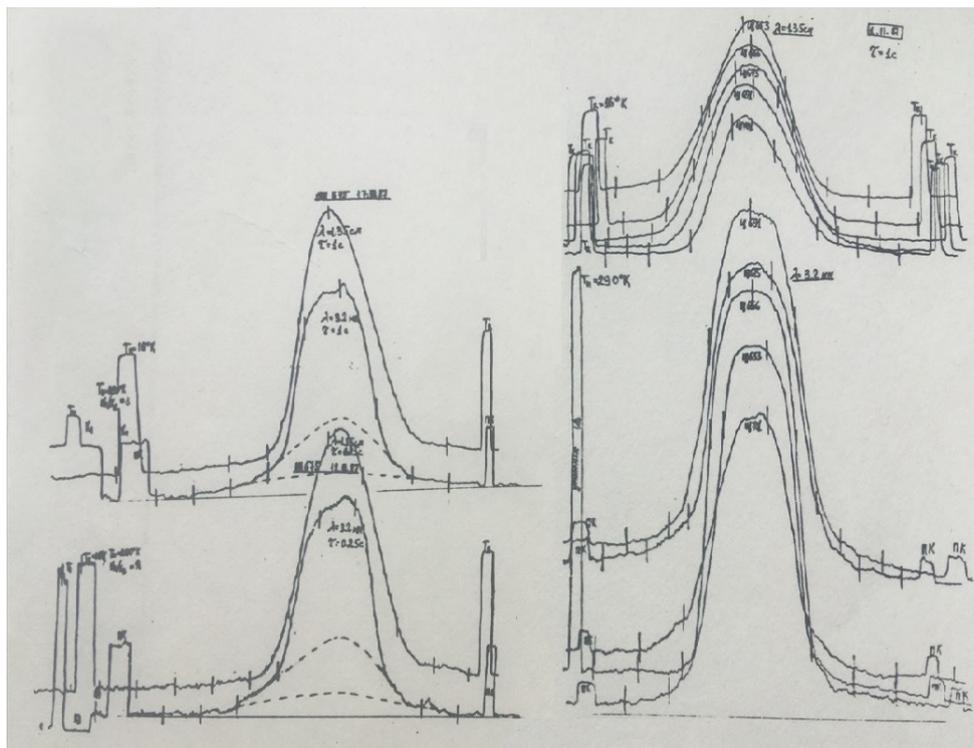


Рис. 1. Записи кривых прохождения Солнца на самописце, полученные с помощью отдельных щитов РАТАН-600 для изучения качества их отражающей поверхности на длинах волн 1.35 см и 3.2 мм в 1987 г.

Среднеквадратичное отклонение (СКО) поверхности центральной части щитов РАТАН-600 размером 2×2 м спустя 25 лет после их последней “переобшивки” составляет не более 0.35 мм, что позволяет наблюдать дискретные источники на Солнце со средней СКО антенны 0.5–0.6 мм при сокращенной апертуре 50 м. Антенная эффективность сокращенной апертуры в диапазоне 3–10 мм ~ 2 –15%. В течение 10 лет после новой “переобшивки” поверхности СКО центральной части щитов кругового и плоского отражателей составляет не более 0.1 мм, а СКО центральной части вторичного зеркала можно получить не хуже 0.1 мм методами лазерной геодезии. В результате специальной подготовки антенны интегральная СКО поверхности на АС “Юг+Плоский” может быть снижена до 0.3 мм, что позволит наблюдать СТВ на длинах волн 3 и 2 мм с антенной эффективностью сокращенной апертуры $\sim 20.4\%$ и полной апертуры $\sim 30\%$ на длине волны 10 мм. Антенная эффективность сокращенной апертуры (100–120 м) на длине волны 10 мм снижается в 1.5–2 раза из-за облучения всего антенного сектора по горизонтали и вертикали.

Для достижения значения СКО взаимной привязки элементов антенны 0.15 мм предложено использовать быстрый радиолографический метод с радиальным движением опорного элемента. Это можно сделать на длине волны 10 мм в автоколлимационном (АК) режиме или по геостационарному спутнику Земли (ГСЗ) Express AMU1 на длине волны 1.5 см в рабочем положении антенны. Контроль АК фокальных пятен можно выполнять на длине волны 3–4 мм (Хайкин и др., 2018). С этой целью в ООО “МВЭЙВ” разработаны высокостабильные источники сигнала на базе синтезаторов частоты на длины волн 4 и 3 мм (Хайкин и др., 2023). Для облучения большей части сектора АС “Юг+Плоский” может использоваться скалярная рупорная антенна диапазона 75–110 ГГц, разработанная АО “Скард Электроникс” (г. Курск). Ширина ДН антенны составляет 45° по уровню -10 дБ. При этом нами ставится задача изучить возможность наблюдений СТВ на длинах волн 10 мм и 3 мм без специальной подготовки антенны и с выносом первичных облучателей из фокуса в процессе штатных наблюдений. Это безусловно снизит качество ДН, антенную эффективность в ММ-диапазоне длин волн и чувствительность инструмента по потоку, но даст возможность выполнять ежедневный мониторинг солнечных вспышек. Как следствие, это позволит чаще регистрировать СТВ с потоком более 100 с. е. п. на длине волны 3 мм. Однако ряд подготовительных антенных процедур совершенно необходим для наблюдений СТВ, кроме штатных автоколлимационных юстировок главного

зеркала радиотелескопа на длине волны 1.8 см, измерения фокальных пятен на длине волны 8 мм и кинематических поправок отдельных щитов методами лазерной геодезии. В первую очередь нужна “привязка” (уточнение) продольного фокуса АС для облучателя тип 3 в разных азимутах, которую можно выполнить по ГСЗ Turksat 3A (42° восточной долготы) в Ku-диапазоне, ГСЗ Express AMU1 (36° восточной долготы) в Ka-диапазоне и по другим ГСЗ.

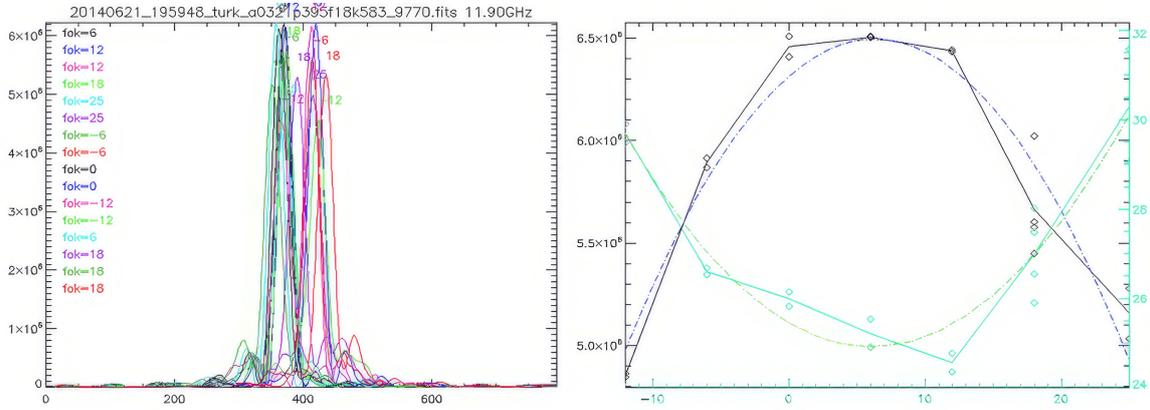


Рис. 2. Пример “привязки” (уточнения) продольного фокуса АС по ГСЗ Turksat 3A: ДН со смещением продольного фокуса антенны (слева), амплитуда и полуширина ДН (справа)

На рис. 2 приведен пример такой процедуры, которая была выполнена на частоте 11.9 ГГц в 2014 г., где смещение фокуса составило 6 мм. Приведенные кривые выглядят медленно спадающими при смещении продольного фокуса, однако на длине волны 3 мм они будут спадать почти на порядок быстрее. Также необходимо устранить систематический разворот вторичного зеркала облучателя тип 3 относительно нормали к продольной оси, приводящий к значительной кубической аберрации типа кома, что требует определенных усилий от службы эксплуатации радиотелескопа.

Для калибровки Солнца по потоку на длине волны 10 мм и длиннее можно использовать радиогалактику 3C274 с компактным источником Дева-А и хорошо известным потоком 21.6/16.8/7.8 Ян на частоте 22.68/32.94/92.89 ГГц. Калибровку наблюдений Солнца по яркостной температуре в СМ- и ММ-диапазонах удобно выполнять по Луне. Измерение ДН АС в диапазоне 3–4 мм можно выполнить по действующему низкоорбитальному (пролетному) экспериментальному спутнику W диапазона W-Cube.

Для наблюдений СТВ предложено использовать коммерчески доступные компактные радиометрические модули прямого усиления W- и, в перспективе, D-диапазонов, разработанные для задач радиовидения с флуктуационной чувствительностью в режиме полной мощности не хуже 0.1–0.2 К/Гц² (Хайкин и др., 2023). С учетом ожидаемых полос приемников их центры соответствуют длинам волн 3.3 и 2.14 мм.

3 Результаты моделирования характеристик РАТАН-600 и ожидаемых изображений СТВ на Солнце

С целью оценки возможности таких коротковолновых наблюдений рассчитаны ожидаемые диаграммы направленности АС “Юг+Плоский” на длинах волн 10, 3 и 2 мм с учетом возможных ошибок поверхности элементов, их взаимной привязки, выноса первичного облучателя из фокуса, а также получены их двумерные свертки с моделью Солнца с источником, одномерные сканы которых соответствуют ожидаемым радиоизображениям Солнца на РАТАН-600. В работе Хайкин и др. (2023) предложен метод расчета ДН АС “Юг+Плоский” радиотелескопа РАТАН-600 в ММ-диапазоне с учетом возможных ошибок поверхности антенны и выноса облучателя из фокуса. Согласно закону Рэлея – Джинса, интегральный тепловой поток СТВ можно представить в виде (Kontar et al., 2018)

$$F = \frac{2\nu^2 k_B T}{c^2} \frac{A}{R^2} \simeq 772 \left(\frac{\nu}{100 \text{ ГГц}} \right)^2 \left(\frac{T}{10^6 \text{ К}} \right) \left(\frac{A}{10^3 \text{ угл. сек}^2} \right) [\text{с. е. п.}], \quad (1)$$

где k_B – постоянная Больцмана, ν – частота, c – скорость света, T – эффективная температура, A – площадь проекции радиоисточника на солнечный диск, R – расстояние от Солнца до Земли, [с. е. п.] – солнечные единицы потока. Тогда для температур $T = 10^4, 10^5, 10^6$ К и $A \approx 1000$ угл. сек² потоки будут соответствовать значениям $F(30 \text{ ГГц}) = 649.80, 6498, 64980$ с. е. п., $F(93 \text{ ГГц}) = 662.445, 6624.45, 62445$ с. е. п., $F(140 \text{ ГГц}) = 1415.12, 141512, 141512$ с. е. п. в предположении оптически толстого источника, где яркостная температура $T_b = T$. Ожидаемую чувствительность инструмента найдем как

$$\Delta F = \frac{2k_B \Delta T_a}{S_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

где ΔT_a – чувствительность телескопа по антенной температуре (2 К), S_{eff} – ожидаемая эффективная площадь антенны (возьмем достижимые значения: для длины волны 10 мм и апертуры 100 м $S_{\text{eff}} = 85 \text{ м}^2$, для длины волны 3.3 мм и апертуры 50 м $S_{\text{eff}} = 20 \text{ м}^2$, для длины волны 2.15 мм и апертуры 50 м $S_{\text{eff}} = 4 \text{ м}^2$). Тогда получим достижимую чувствительность после юстировки и “привязки” фокуса антенны: $\Delta F(10 \text{ мм}) \sim 0.025$ с. е. п., $\Delta F(3.3 \text{ мм}) \sim 1$ с. е. п., $\Delta F(2.15 \text{ мм}) \sim 30$ с. е. п., а также с минимально возможным выносом из фокуса 7–12 см: $\Delta F(10 \text{ мм}/13 \text{ см}) \sim 0.05$ с. е. п., $\Delta F(3.3 \text{ мм}/10 \text{ см}) \sim 2$ с. е. п., $\Delta F(2.14 \text{ мм}/7 \text{ см}) \sim 60$ с. е. п. Однако по нашим оценкам, без вышеупомянутых подготовительных антенных процедур фактическая чувствительность по потоку на длине волны 10 мм в несколько раз хуже, а на длине волны 3.3 мм – на порядок хуже.

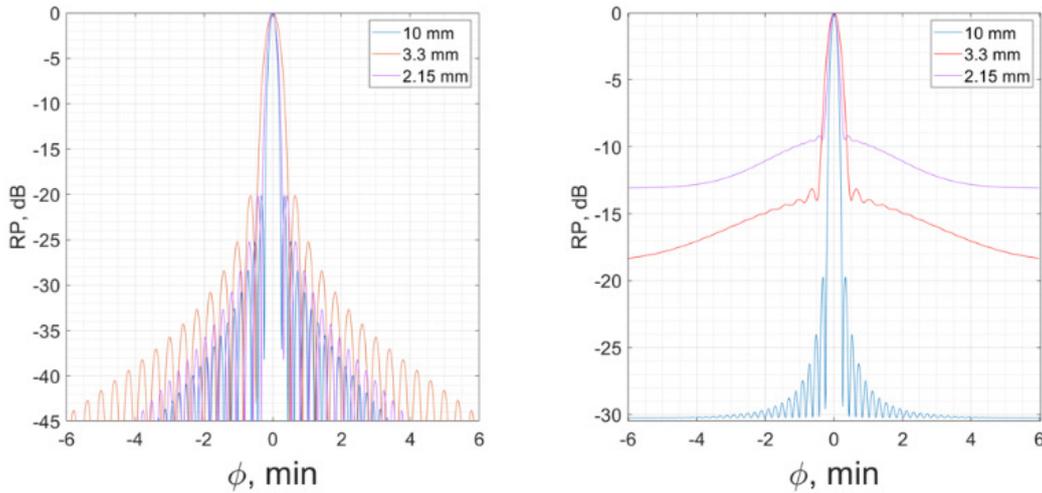


Рис. 3. Сечения ДН по сферической координате ϕ на длинах волн 10, 3.3 и 2.14 мм с ошибками (справа) и без них (слева)

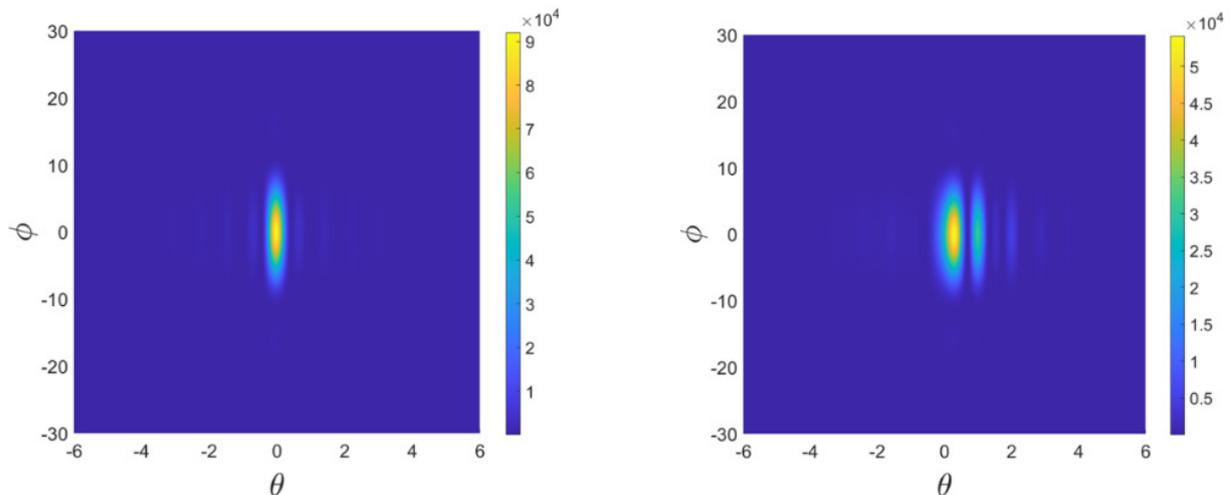


Рис. 4. Двумерные ДН с выносом из фокуса приемника на 12 см (справа) и без выноса (слева)

На рис. 3 представлены расчетные одномерные и двумерные ДН. Однако практическая реализация регулярных наблюдений СТВ в фокусе, где обычно находится штатный облучатель солнечного комплекса, невозможна. Наблюдения СТВ с выносом из фокуса ведут к искажению формы ДН и ослаблению сигнала от источника. На рис. 4–7 представлены ДН с выносом из фокуса. Искажения

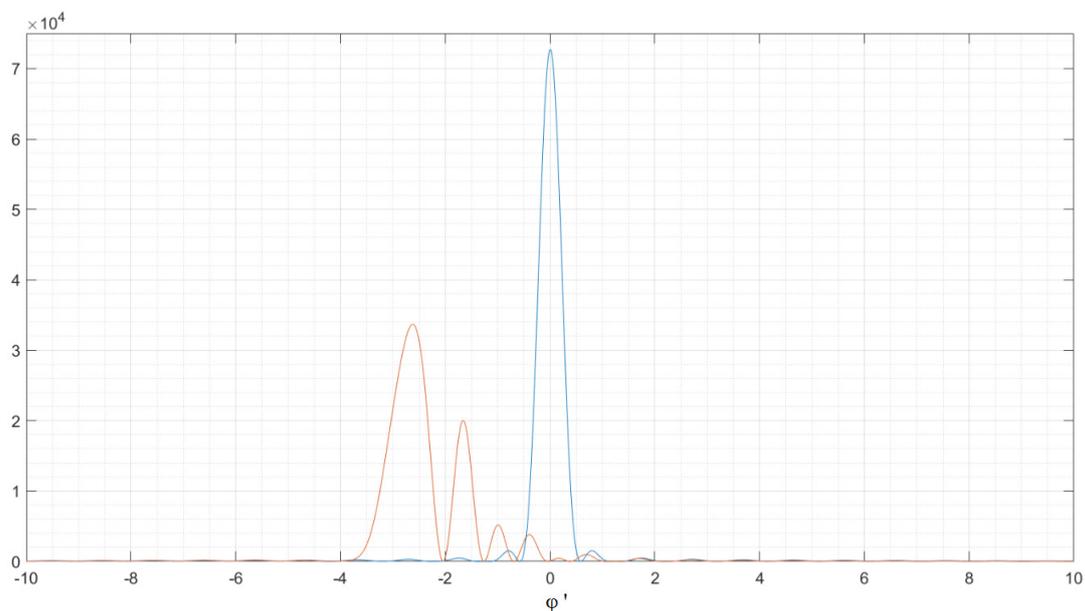


Рис. 5. ДН для апертуры 100 м на длине волны 10 мм с выносом из фокуса приемника на 12 см (красная кривая) и без выноса (синяя кривая)

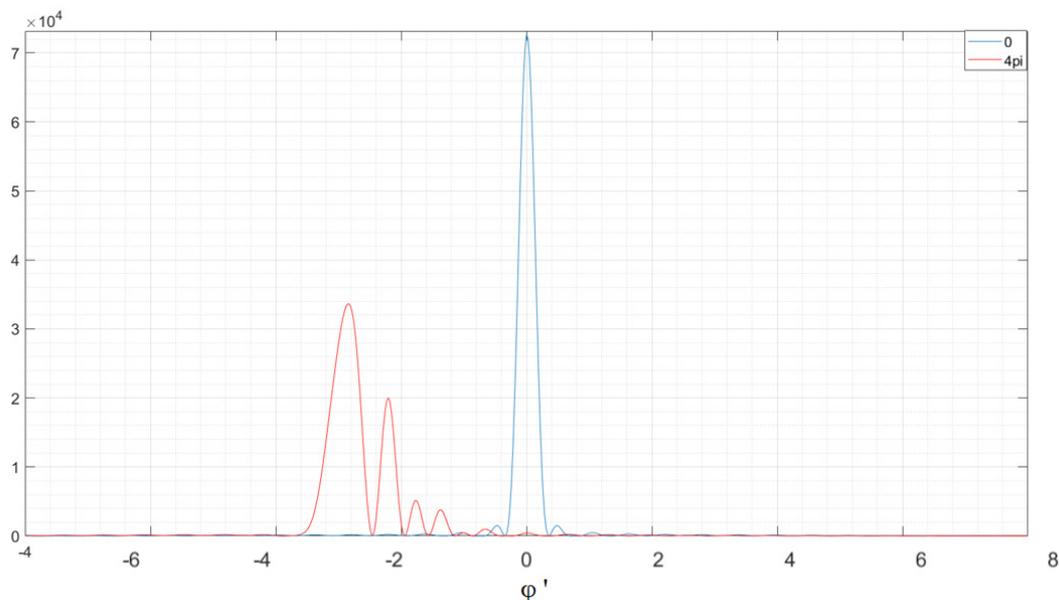


Рис. 6. ДН для апертуры 50 м на длине волны 3.3 мм с выносом из фокуса приемника на 10 см (красная кривая) и без выноса (синяя кривая)

формы ДН не так опасны, поскольку их можно смоделировать, но потери мощности сигнала на трассе распространения дадут падение чувствительности по потоку в ~ 2 раза на длине волны 10 мм с апертурой 100 м и в ~ 2 раза на длине волны 3.3 мм с апертурой 50 м. На рис. 8–9 приведены

свертки модели Солнца для достаточно компактного источника в форме диска и $T_b = 10^5$ К с полученными ДН. Двумерные свертки – это не полная абстракция для АС “Юг+Плоский” радиотелескопа РАТАН-600. Их можно получить практически в процессе сопровождения Солнца облучателем, сканируя Солнце кареткой с приемниками и изменяя высоту плоского отражателя после каждого скана. В результате может быть получена двумерная карта Солнца, аналогичная представленным на рис. 8–9. Время получения такой карты с десятью сканами Солнца кареткой составит ~ 10 минут. Ее анализ может быть полезным в начале ежедневных наблюдений Солнца, чтобы выбрать на Солнце АО, имеющую наибольший контраст на длине волны 10 мм. Это позволит в дальнейшем ее наблюдать в режиме многоазимутального прохождения или сопровождения.

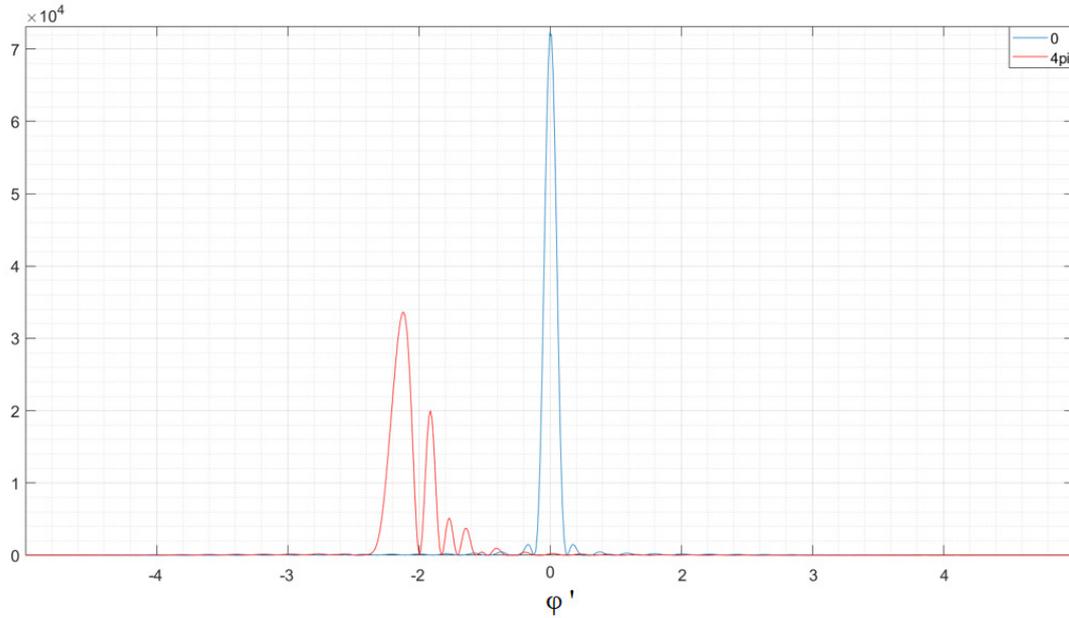


Рис. 7. ДН для апертуры 50 м на длине волны 2.14 мм с выносом из фокуса приемника на 7 см (красная кривая) и без выноса (синяя кривая)

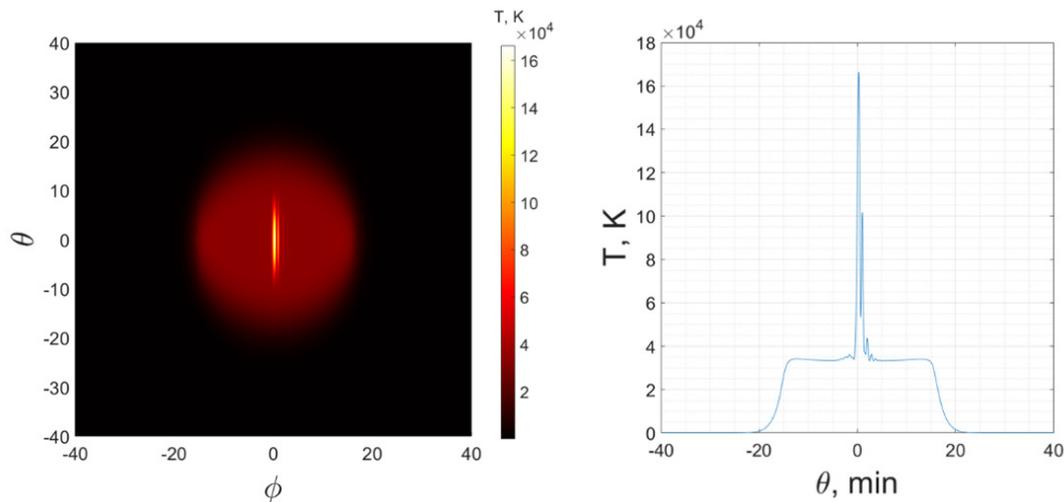


Рис. 8. Свертка модели Солнца с компактным источником в виде диска с коматической ДН (вынос из фокуса 10λ) на длине волны 10 мм (апертура 120 м)

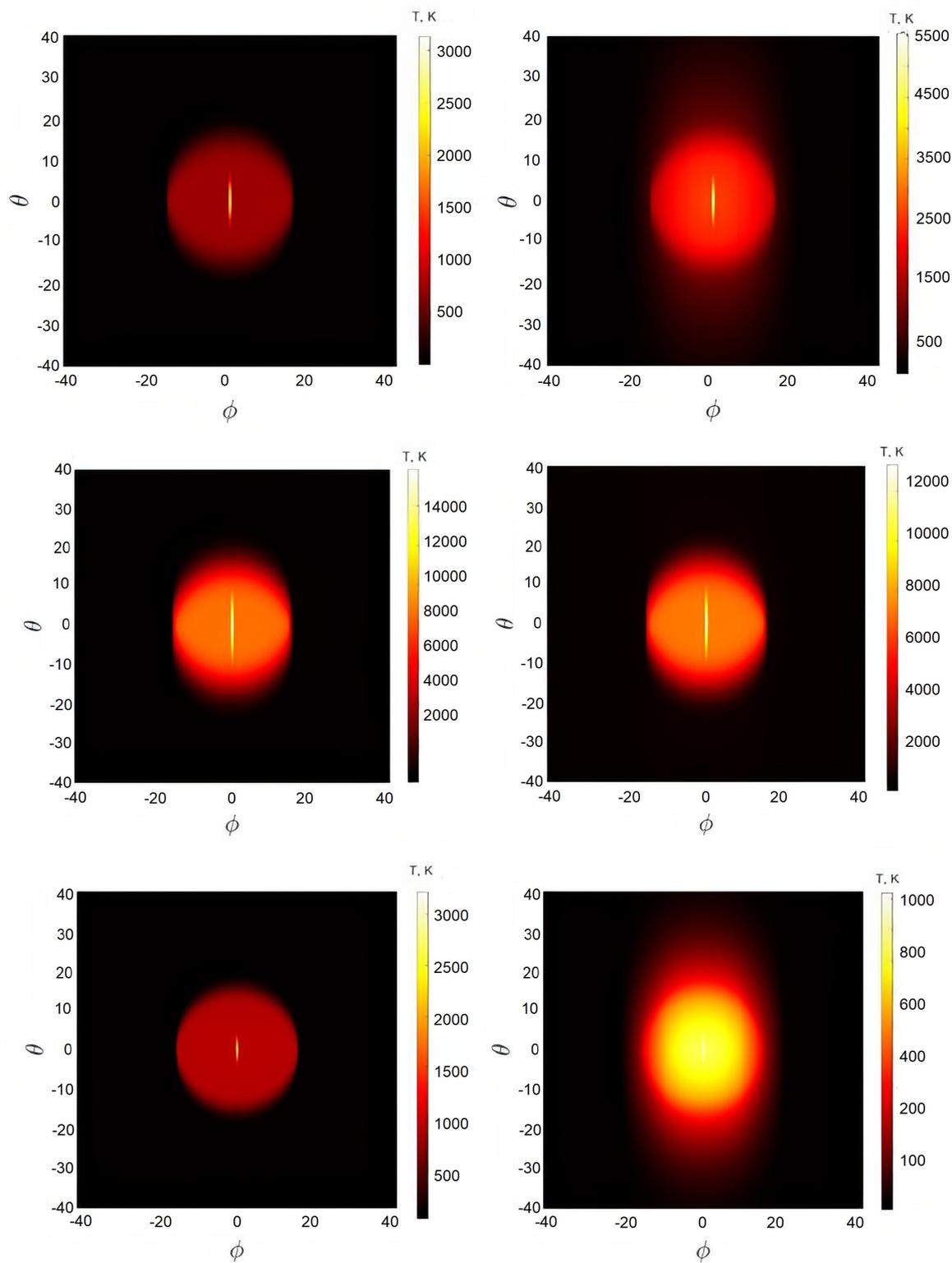


Рис. 9. Свертки модели Солнца с лимбовым уярчением и компактным источником в виде диска с полученными ДН на длине волны 10 мм (вверху), 3.3 мм (середина) и 2.15 мм (внизу) с ошибками (справа) и без них (слева)

Из рис. 9 видно, что длина волны 2 мм для наблюдений СТВ в нынешнем состоянии радиотелескопа неэффективна и требует существенного улучшения качества отражающей поверхности.

3.1 Ожидаемая частота и планы наблюдений СТВ

Важным для нас является вопрос о частоте появления СТВ. В работе [Kontar et al. \(2018\)](#) описаны только 16 СТВ с положительным наклоном спектра за период 2000–2014 гг., но это те события, которые удалось полноценно пронаблюдать и опубликовать. В марте 2022 года на Солнце произошло 146 вспышек, в том числе 14 вспышек рентгеновского класса М. В среднем происходит более 100 вспышек класса М и 10 вспышек X-класса в год в период максимума солнечной активности.

Основными причинами отсутствия достаточного для адекватной интерпретации объема наблюдательных данных в суб-ТГц диапазоне являются высокие требования к параметрам приемной аппаратуры и антенной системы радиотелескопов, в частности, к точности поверхности антенн, чувствительности приемников, методам определения поглощения сигнала в земной атмосфере и к решению задач по первичной калибровке и обработке данных. Сложность технических решений и трудности выбора наиболее подходящего места расположения радиотелескопов коротковолнового диапазона ограничивают число высококачественных суб-ТГц наблюдений. Поэтому, в связи с развитием новых моделей вспышечного процесса и природы солнечной активности, постоянные суб-ТГц наблюдения совместно с многоволновыми данными в других диапазонах являются актуальными.

В 2022 году на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана было зарегистрировано более 60 СТВ рентгеновских классов С и М на частоте 93 ГГц, что говорит о достаточно высокой вероятности таких событий ([Рыжов и др., 2023](#)). Все вспышки класса М, которые наблюдали на РТ-7.5 на двух частотах (93 и 140 ГГц), являлись суб-ТГц событиями (наблюдался положительный наклон спектра между 93 и 140 ГГц). По данным наблюдений на SST (212 и 405 ГГц), из всех вспышек около 25 % – это суб-ТГц события с положительным наклоном спектра ([Fernandes et al., 2017](#)).

В последние годы в различных звездных источниках, включая Проксиму Центавра, были обнаружены первые СТВ с положительным наклоном спектра. Это стало возможным благодаря использованию оптических и радиотелескопов, в том числе радиоинтерферометра миллиметрового диапазона Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), работающего на длине волны 1.3 мм с линейной и круговой поляризацией ([MacGregor et al., 2021](#)). Такой подход стимулирует проведение поляризационных наблюдений СТВ на Солнце с высоким пространственным разрешением. В настоящее время на РАТАН-600 разрабатывается солнечный приемник для измерения круговой поляризации в диапазоне 30–40 ГГц. С учетом возможности регулярных наблюдений СТВ на РТ-7.5 с чувствительностью по потоку не хуже 0.01 с. е. п. предложено проводить совместные синхронные наблюдения СТВ на радиотелескопе ММ-диапазона РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана и РАТАН-600 в диапазоне 1–100 ГГц, что позволит уточнить W-образную форму спектра СТВ в ДМ- (дециметровом), СМ- и ММ-диапазонах. В частности, одновременные поляризационные наблюдения планируется проводить как на РАТАН-600 в диапазоне 1–3 ГГц с круговой поляризацией и высоким частотным и временным разрешением на частотах 4.7, 8.3, 30 и 93 ГГц, так и на РТ-7.5 на частотах 93 и 140 ГГц.

4 Заключение

АС “Юг+Плоский” радиотелескопа РАТАН-600 с сокращенной (50–100 м) апертурой может быть использована для наблюдений СТВ с положительным наклоном спектра в диапазоне длин волн 10 и 3 мм. Для наблюдений СТВ на длине волны 2 мм требуется проведение новых работ по улучшению качества отражающей поверхности щитов, аналогичных тем, что были предприняты в 90-е годы.

Как показало моделирование антенных характеристик с учетом ошибок поверхности и выноса облучателя из фокуса, фактическая чувствительность по потоку на Солнце сегодня может составить 1–2 с. е. п. на длине волны 3.3 мм при проведении ряда подготовительных антенных процедур. Первоочередной подготовительной антенной процедурой является “привязка” (уточнение) продольного фокуса АС на облучателе тип 3 в разных азимутах по ГСЗ Turksat 3A/4A (42° восточной долготы) в Ku-диапазоне, ГСЗ Express AMU1 (36° восточной долготы) в Ka-диапазоне и по другим ГСЗ, а также точная установка вторичного зеркала по нормали к продольной оси АС, что кардинально улучшает антенные характеристики инструмента на длине волны 3 мм. Следующей важной технологией наблюдений является быстрая радиологическая юстировка антенны по ГСЗ Express AMU1

на волне 1.5 см и последующий контроль характеристик антенны на волне 3–4 мм в АК-режиме и по пролетному спутнику W-Cube. Калибровку результатов наблюдений Солнца на РАТАН-600 по яркостной температуре в СМ- и ММ-диапазонах удобно выполнять по Луне.

С учетом возможности регулярных наблюдений Солнца на РТ-7.5 на частотах 93 и 140 ГГц целесообразно проводить наблюдения СТВ совместно с РАТАН-600 в диапазоне 1–100 ГГц, что позволит уточнить W-образную форму спектра СТВ в ДМ-, СМ- и ММ-диапазонах.

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, и при поддержке гранта РФФИ 20-52-26006 Чехия_а (В.В. Смирнова).

Литература

- Госачинский И.В., Майорова Е.К., Парийский Ю.Н., 1989. Сообщения САО. № 63. С. 38–49. [Gosachinskii I.V., Maiorova E.K., Pariiskii Yu.N., 1989. SAO reports, no. 63, pp. 38–49. (In Russ.)]
- Куприянова Е.Г., Колотков Д.Ю., Накаряков В.М., Кауфман А.С., 2020. Солнечно-земная физика. Т. 6. № 1. С. 3–29. [Kupriyanova E.G., Kolotkov D.Yu., Nakariakov V.M., Kaufman A.S., 2020. Solar-terrestrial physics, vol. 6, no. 1, pp. 3–29. (In Russ.)]
- Майорова Е.К., 1987. Известия САО. № 25. С. 135–142. [Maiorova E.K., 1987. SAO reports, no. 25, pp. 135–142. (In Russ.)]
- Рыжов В.С., Шиврина П.В., Смирнова В.В., 2023. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 119. № 1. С. 11–18. [Ryzhov V.S., Shivrina P.V., Smirnova V.V., 2023. Izv. Krimsk. Astrofiz. Observ., vol. 119, no. 1, pp. 11–18. (In Russ.)]
- Степанов А.В., 2019. Труды международной молодежной научной байкальской школы по фундаментальной физике. С. 30–34. [Stepanov A.V., 2019. Proceedings of the Baikal young scientists' international school on fundamental physics, pp. 30–34. (In Russ.)]
- Стороженко А.А., Богод В.М., Лебедев М.К. и др., 2021. Труды XXV Всероссийской конференции “Солнечная и солнечно-земная физика – 2021”. С. 253. [Storozhenko A.A., Bogod V.M., Lebedev M.K., et al., 2021. Proceedings of XXV All-Russian conference “Solar and solar-terrestrial physics – 2021”, p. 253. (In Russ.)]
- Хайкин В.Б., 2023. Труды XXIX Международного симпозиума “Оптика атмосферы и океана”. Томск: Издательство ИОА СО РАН. С. А-361. [Khaikin V.B., 2023. Proceedings of XXIX International conference “Atmospheric and ocean optics”, p. A-361. (In Russ.)]
- Хайкин В.Б., Лебедев М.К., Рипак А.М., 2018. Труды ИПА РАН. № 47. С. 48–63. [Khaikin V.B., Lebedev M.K., Ripak A.M., 2018. Trans. Inst. Appl. Astron. RAS, no. 47, pp. 48–63. (In Russ.)]
- Хайкин В.Б., Макоев Г.А., Стороженко А.А., Муравьев В.М., 2023. Труды Всероссийской конференции “РЭУС-ИТ 2023”. С. 57. [Khaikin V.B., Makoev G.A., Storozhenko A.A., Murav'ev V.M., 2023. Proceedings of the All-Russian conference “REDS-2023”, p. 57. (In Russ.)]
- Шиховцев А.Ю., Хайкин В.Б., Миронов А.П., Ковадло П.Г., 2022. Оптика атмосферы и океана. Т. 35. № 1. С. 67–73. [Shihovtsev A.Yu., Khaikin V.B., Mironov A.P., Kovadlo P.G., 2022. Optika atmosfery i okeana, vol. 35, no. 1, pp. 67–73. (In Russ.)]
- Bubnov G., Vdovin V., Khaikin V., Tremblin P., Baron P., 2020. Proceedings of 7th Russian Microwave Conference, pp. 229–232.
- Clark C.D., Park W.M., 1968. Nature, vol. 219, p. 922.
- Fernandes L.O.T., Kaufmann P., Correia E., et al., 2017. Solar Phys., vol. 292, iss. 1, id. 21.
- Fleishman G.D., Kontar E.P. 2010. Astrophys. J. Lett., vol. 709, L127.
- Kaufmann P., Trotter G., Giménez de Castro C.G., et al., 2000. Solar Phys., vol. 197, iss. 2, pp. 361–374.
- Kaufmann P., Trotter G., Giménez de Castro C.G., et al., 2009. Solar Phys., vol. 255, iss. 1, pp. 131–142.
- Khaikin V.B., Majorova E.K., Efimov I.G., Victorov O.A., 2000. Astron. Astrophys. Trans., iss. 3–4, pp. 596–611.
- Kontar E.P., Motorina G.G., Jeffrey N.L.S., et al., 2018. Astron. Astrophys., vol. 620, id. A95.
- Krucker S., Giménez de Castro C.G., Hudson H.S., et al., 2013. Astron. Astrophys. Rev., vol. 21, id. 58.
- Kundu M.R., Vlahos L. 1982. Space Sci. Rev., vol. 32, iss. 4, p. 405.
- Lüthi T., Magun A., Miller M., 2004. Astron. Astrophys., vol. 415, pp. 1123–1132.
- MacGregor M.A., Weinberger A.J., Loyd R.O.P., et al., 2021. Astrophys. J. Lett., vol. 911, L25.
- Skokić I., Benz A.O., Brajša R., et al., 2023. Astron. Astrophys., vol. 669, A156.

- Smirnova V.V., Tsap Yu.T., Morgachev A.S., Motorina G.G., Bárta M., 2021. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 61, iss. 7, pp. 993–1000.
- Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Morgachev A.S., et al., 2016. *Adv. Space Res.*, vol. 57, iss. 7, pp. 1449–1455.
- Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Motorina G.G., Morgachev A.S., Kuznetsov S.A., Nagnibeda V.G., Ryzhov V.S., 2018. *Solar Phys.*, vol. 293, iss. 3, id. 50.
- Zaitsev V.V., Stepanov A.V., 2015. *Solar Phys.*, vol. 290, iss. 12, pp. 3559–3572.

On the possibility of observations of solar sub-terahertz flares with the RATAN-600 radio telescope

V.B. Khaikin¹, G.A. Makoev¹, V.V. Smirnova²

¹ Special Astrophysical Observatory RAS (Saint-Petersburg department), Pulkovskoe sh. 65, Saint Petersburg, 196140, Russia

vkhstu@mail.ru

² Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409

v_vsvid.smirnova@yandex.ru

Abstract. A technique for observing solar sub-terahertz flares (STFs) with the RATAN-600 radio telescope is proposed. STF observations are supposed to be carried out during the routine multi-azimuth observations of the Sun.

The expected beams of the antenna system at frequencies of 30, 93, and 140 GHz (10, 3, and 2 mm) were calculated taking into account possible errors of the element surfaces in their mutual alignment, as well as getting out the focus of the primary feed. The two-dimensional convolutions of the calculated beams with the solar disk model were obtained, whose one-dimensional scans correspond to the expected radio images of the Sun from RATAN-600. The expected STF fluxes are estimated with the model according to which sub-terahertz radiation is generated due to the thermal bremsstrahlung mechanism of optically thick plasma located in the chromosphere and transition region.

We propose the simultaneous observations of STFs with RATAN-600 at frequencies of 1.2–18, 30, 93 GHz and with the Bauman Moscow State Technical University RT-7.5 radio telescope at frequencies of 93 and 140 GHz. Such joint multi-frequency observations will make it possible to clarify the W-shaped spectrum of solar flares in the decimeter, centimeter, and millimeter ranges and to elucidate the nature of sub-terahertz radiation from solar flares with a positive spectral slope.

Key words: radio telescope, solar activity, sub-terahertz flares