

УДК 524.316.082-77:52-126

ПОИСК АКТИВНОСТИ СОЛНЕЦЕПОДОБНЫХ КАРЛИКОВ С ЗЕМЛЕПОДОБНЫМИ ПЛАНЕТАМИ В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

© 2026 Г. М. Бескин^{1*}, В. Н. Черненко^{1**},
Н. Н. Бурсов^{1***}, А. А. Шляпников^{2****}, А. Д. Панов^{3*****}

¹Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Научный, 298409 Россия

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 10 июня 2025 года; после доработки 31 октября 2025 года; принята к публикации 24 февраля 2026 года

В статье представлены результаты многоволновых радионаблюдений на РАТАН-600 шестнадцати солнцеподобных карликов с планетами земного типа в зонах жизни. Использовались радиометры четырех диапазонов частот: 22, 11, 4.7 и 2.3 ГГц (1.38, 2.68, 6.38, 13.3 см) — в режиме прохождения с квазисовременной регистрацией, частотой дискретизации сигнала около 18 Гц и длительностью наблюдения (временем прохождения через диаграмму направленности телескопа) 1.5–15 с. В апреле–мае 2018 г. проводилось от 3 до 27 наблюдений, при этом радиоизлучение не было обнаружено. Установлены верхние пределы его интенсивности во вспышках длительностью 0.05–10 с на уровне 80–800 мЯн, что соответствует светимости 10^{24} – 10^{29} эрг с^{−1}, и в стационарном состоянии светимостью 10^{23} – 10^{28} эрг с^{−1}. За время наблюдений зарегистрировано 11 аномальных выбросов в измеренном потоке на уровне 100 мЯн, являющихся, по всей видимости, аппаратными или атмосферными помехами (грозы, самолеты, спутники). Если предположить искусственное происхождение искомого радиоизлучения (передача с обитаемых планет), то верхние пределы мощности гипотетических передатчиков составили бы $2 \times (10^7$ – $10^{12})$ Вт. Подчеркнем, что нижняя граница этих оценок всего лишь в 20 раз превышает мощность передатчика телескопа Аресибо.

Ключевые слова: *звезды: активность — радиоизлучение с непрерывным спектром: планетарные системы*

1. ВВЕДЕНИЕ

Карлики поздних спектральных классов, от F до M, обычно классифицируются как звезды солнечного типа на основании сходства их активности с активностью Солнца (Gershberg et al., 2024; Matthews, 2019; Stepanov, 2003). В нашей Галактике эта популяция содержит, по разным оценкам, около 160 млрд объектов, что составляет примерно 80% всего звездного населения.

Переменность этих звезд, так же как и Солнца, обусловлена магнитной активностью, которая проявляется в периодических изменениях яркости в результате вращения (Engle and Guinan, 2023; Schrijver, 2002) и спорадических вспышках — следствии пересоединения силовых линий

магнитного поля (Kowalski, 2024). Сами магнитные поля генерируются совместным действием дифференциального вращения и конвекции (Brun and Browning, 2017). Эффекты активности наблюдаются в спектральных диапазонах от рентгеновского до радио и, превышая солнечный уровень в 100–1000 раз (Gershberg et al., 2024), могут существенно повлиять на возможность возникновения и сохранения жизни на планетах, обнаруженных вокруг красных карликов (Engle and Guinan, 2011).

Каталог Gaia DR3 (Vallenari et al., 2023) содержит около полумиллиона звезд солнечного типа, причем наибольшее их количество относится к спектральному классу M (около 23%), а максимум в распределении звездных величин в полосе V приходится на интервал 11^m–12^m. Вспышка с наибольшей амплитудой $\Delta U \approx 12^{\text{m}5}$ была зарегистрирована у красного карлика V374 Peg ($V = 12^{\text{m}01}$, M3.5 Ve, Batyrshinova and Ibragimov, 2001).

*E-mail: beskin@sao.ru

**E-mail: vch@sao.ru

***E-mail: nnb@sao.ru

****E-mail: aas-crao@mail.ru

*****E-mail: panov@dec1.sinp.msu.ru

Исследования звездных вспышек с использованием моделирования в рамках радиационной гидродинамики и физической диагностики спектров, а также многоволновых наблюдений и анализа на их основе процессов в звездных атмосферах дали в последние годы важные результаты (Kowalski, 2024).

Исключительную роль здесь сыграли наблюдения космических телескопов Кеплер и TESS, предназначенных для поиска экзопланет и, как следствие, для изучения возможной связи вспышек с возникновением и развитием жизни на них. Поскольку в этих программах использовался транзитный метод поиска (75% обнаружений), наиболее чувствительный при наблюдении маломассивных красных карликов (Collier Cameron, 2016), то эти объекты изучались в больших количествах. В частности, каталог результатов наблюдений телескопом Кеплер содержит 51 542 звезды главной последовательности (ГП) спектральных классов А–М, у которых обнаружено 16 066 вспышек. Максимальное их количество, 5445, зарегистрировано у 2222 М-карликов, а энергия всех исследованных событий превысила 10^{33} эрг (Althukair and Tsiklauri, 2023).

Большинство звезд солнечного типа в нижней части ГП демонстрируют медленно меняющееся радиоизлучение в диапазоне частот от 50 МГц до 100 ГГц с потоком в диапазоне 0.1–2.5 мЯн, которое может сохраняться годами с некоторыми исключениями (см. ниже), и вспыхивающую активность на временных масштабах от секунд до минут с потоком до 10 мЯн (Gershberg et al., 2024; Matthews, 2019; Stepanov, 2003). Оба явления основаны на сочетании аврорального излучения и быстро развивающихся экспоненциально затухающих процессов коронального энерговыделения.

Для определения радиоизлучения в спокойном состоянии были проанализированы многолетние ряды наблюдений и индивидуальные оценки потока, сделанные в разные эпохи (в некоторых случаях промежутки между наблюдениями составляли годы) (Gershberg et al., 2024). В частности, для 44 звезд на 12 частотах в диапазоне 857 МГц–375 ГГц при отсутствии вспышек зарегистрирован поток на уровне 0.054 мЯн. Для двух звезд, YZ CMi (на 375 и 273 ГГц) и Gl 867 B (на 5 ГГц), поток составлял 14 мЯн для отдельных эпох в спокойном состоянии, а для Gl 867 B он плавно изменялся от 14 до 0.2 мЯн в течение месяца. Gershberg et al. (2024) отметили, что в некоторых случаях регистрируемый поток от звезд не связан с излучением спокойных корон, а обусловлен отдельными активными событиями.

Быстрорастущие, экспоненциально затухающие вспышки различной амплитуды зарегистрированы

у большинства звезд спектральных классов F–M. Например, вспыхивающая активность 17 звезд солнечного типа подробно описана в Gershberg et al. (2024). Наблюдения проводились в широком диапазоне радиочастот — от 4.9 МГц до 231 ГГц. Зафиксированы вспышки с амплитудами от 0.4 мЯн до 1.6 Ян (!) и с характерными временами от одной микросекунды до трех часов. В последнем случае столь длительное, сильно поляризованное излучение не имело аналогов среди солнечных явлений. Суммарная энергия всплесков в отдельных случаях превышала энергию подобных событий на Солнце на четыре порядка, а регистрируемый поток был в 5–6 раз больше уровня спокойного радиоизлучения.

Данные по радиоизлучению звезд обобщены в каталоге Driessen et al. (2024), который включает 839 объектов, наблюдавшихся в общей сложности 3405 раз; из них 756 идентифицированы в базе данных SIMBAD¹⁾. В этой выборке 206 звезд являются карликами спектральных классов F–M, для которых минимальный поток, 0.18 мЯн, был зарегистрирован на частоте 1.4 ГГц, а максимальный, 19.2 мЯн, — на частоте 887.5 МГц.

Как уже отмечалось выше, активность родительских звезд экзопланет (особенно М-карликов) может играть исключительную роль как в зарождении, так и в сохранении жизни на этих планетах (см., например, Engle and Guinan, 2011 и ссылки в ней). Радиоизлучение при этом отражает процессы генерации энергичных частиц в звездном ветре, которые воздействуют на атмосферы и поверхности экзопланет (Gershberg et al., 2024).

Кросс-отождествление каталога Driessen et al. (2024) и базы данных экзопланет NASA²⁾ выявила совпадение в пределах 2'' для девяти звезд: 2MASS J21252752–8138278, AB Pic, AF Lep, 2MASS J01033563–5515561, AU Mic, GJ 1151, GJ 896 A, Proxima Cen, PZ Tel. На сегодняшний день лишь у этих звезд с экзопланетами, по-видимому, обнаружено радиоизлучение.

При поиске радиоизлучения на частотах 4–8 ГГц от 77 звезд с 140 экзопланетами сигнал был обнаружен только у звезды GJ 3323 — поток составил 86 ± 10 мкЯн, что соответствует светимости 10^{22} эрг с^{–1}; это значение служит верхним пределом для излучения остальных объектов (Driessen et al., 2024).

Помимо исследования естественного радиоизлучения от звезд, уже более 60 лет проводятся поиски радиопередач от внеземных цивилизаций (ВЦ), как направленных непосредственно на Землю, так и предназначенных другим цивилизациям

¹⁾<https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/>

²⁾<https://science.nasa.gov/exoplanets/>

(Siemion et al., 2013; Enriquez et al., 2017; Price et al., 2020; Panov et al., 2021, 2025). Программа SETI³⁾ пока не принесла ожидаемых результатов: ни в радио-, ни в оптическом диапазонах техносигнатуры не обнаружены (Siemion et al., 2013; Enriquez et al., 2017; Price et al., 2020). В последние годы эти наблюдения проводились в гигагерцовом диапазоне, но для наиболее обширного поиска узкополосного излучения искусственного происхождения использовались низкие частоты. Из каталогов TESS и Gaia 1 631 198 звезд были синхронно изучены в диапазоне 110–190 МГц на двух международных станциях LOFAR (в Ирландии и Швеции) (van Haarlem et al., 2013). Полученные данные позволили установить верхний предел мощности передачи на уровне 10^{17} Вт (Johnson et al., 2023).

В 2015–2016 годах мы провели ряд регулярных наблюдений по программе SETI с использованием радиотелескопа РАТАН-600. Объектами поиска радиоизлучения искусственного происхождения стали около 30 звезд солнечного типа и два шаровых скопления с высокой металличностью. Направленные сигналы, а также другие техносигнатуры обнаружены не были — определены лишь верхние пределы мощности их гипотетических передатчиков (Panov et al., 2019).

Особенность этих исследований — многократное повторение сетов наблюдений (мониторинга) одних и тех же объектов. Такой подход обусловлен априорными представлениями о стратегии отправки сигналов другим цивилизациям — передачи должны регулярно повторяться.

Аналогичная методика используется в программе, результаты которой представлены Beskin et al. (2023) и в данной работе. Мы повторно наблюдали в режиме прохождения на радиотелескопе РАТАН-600 16 звезд солнечного типа (карлики М, два G и один K) с планетами земного типа, орбиты которых локализованы в зонах жизни⁴⁾. Регистрация проводилась квазисинхронно на четырех длинах волн (1.38, 2.68, 6.38 и 13.33 см) с временным разрешением около 50 мс.

Целью наблюдений был поиск спокойного и вспыхивающего радиоизлучения звезд для анализа влияния генерирующих его процессов на физико-химические условия в атмосферах и на поверхности планет, а также сигналов от гипотетических цивилизаций земного типа, предположительно населяющих эти планеты.

Характеристики оборудования, режим наблюдений и методы обработки данных описаны в разделах 2–4. В разделе 5 приведены список 16 карликов ГП с планетами в зоне жизни, которые были

выбраны для исследования, и сведения об этих объектах. В разделе 6 представлены результаты измерений.

2. ОБОРУДОВАНИЕ, РЕЖИМ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ

Наблюдения проводились с 6 апреля по 7 мая 2018 года, преимущественно в ночное время, на Южном секторе РАТАН-600 с плоским отражателем и подвижным облучателем — вторичным зеркалом No. 2, которое ежедневно откатывалось по рельсам для совмещения с другими наблюдательными программами. Измерения выполнялись в режиме прохождения источника через неподвижную диаграмму направленности (ДН) телескопа. В работе использовался штатный комплект радиометров «Эридан-2» (Berlin et al., 2012) и один дополнительный радиометр, центральные длины волн и полосы пропускания которых составляют 1.38, 2.68, 6.38, 13.33 см и 2.5, 0.8, 0.6, 0.4 ГГц соответственно. Запись производилась системой сбора данных (Tsybulev, 2011) в ускоренном режиме с частотой дискретизации около 18 Гц (временное разрешение 54.8 мс) для каждого частотного канала. Каждый радиометр использовал по одному рупору, их местоположение и горизонтальные смещения от фокуса представлены в таблице 1.

Каретка с радиометрами оставалась неподвижной при прохождении источника через ДН, поэтому накопление сигнала за одно наблюдение определялось исключительно шириной диаграммы в каждом из четырех частотных каналов. Поскольку приемные тракты работали в модуляционном режиме, для каждого из двух полупериодов модуляции формировалась отдельная запись. Результирующий единый файл наблюдений для каждого радиометра представлял собой поэлементную сумму этих записей.

Согласно методике, на каждой длине волны в каждом сете наблюдений анализируется исходный массив измерений антенной температуры — выборка с временным разрешением около 50 мс и суммарной длительностью прохождения через ДН телескопа трех участков неба: с наблюдаемым объектом (сегмент 1) и двух контрольных — до него (сегмент 0) и нулевая гипотеза об отсутствии сигнала от объекта на уровне значимости 1%. Перед этим контрольные подвыборки (сегменты 0 и 2) проходят цензурирование — сегменты с аномально высокой дисперсией исключаются с целью фильтрации помех.

Во всех наших наблюдениях нулевая гипотеза не отвергается, то есть сигнал неизменно отсутствует, в силу чего устанавливается (с использованием выборочной дисперсии) верхний предел на

³⁾Search for Extraterrestrial Intelligence.

⁴⁾<https://phl.upr.edu/hwc>, доступ на 28 октября 2024 года.

Таблица 1. Параметры радиометров на каретке вторичного зеркала

Центральная длина волны, см	Расположение рупора	Горизонтальное смещение, см
1.38	восток	−1.35
2.68	запад	5.05
6.38	запад	12.9
13.33	запад	34.3

его уровень в диапазоне от 50 мс до несколько секунд, то есть ограничение для стохастической переменности любого типа (не только импульсной!) с доверительной вероятностью 99%. В свою очередь, оценка верхнего предела среднего генеральной совокупности с использованием t -распределения по измерениям во всем интервале прохождения объектом диаграммы, преобразованным с помощью диаграммного фильтра для точечного источника, ограничивает стационарное излучение объекта в течение сета наблюдений (это и есть предел по обнаружению точечного источника!). Наконец, дисперсионный анализ совокупности этих оценок во всем наборе наблюдений объекта (от 2 до 26 сетов) дает ограничения для среднего стационарного (по крайней мере на временах дни—месяц) радиоизлучения и амплитуды его переменности от сета к сету (на шкале дни—недели).

С использованием данных наблюдений калибровочных источников полученные пределы были преобразованы в плотности радиопотоков и светимости в полосах пропускания приемников (комментарии к оценке светимости см. в разделе 5).

Таким образом, в работе на основе одного набора данных решались следующие задачи:

- 1) поиск стационарного радиоизлучения усредненного за все время наблюдений;
- 2) поиск стационарного радиоизлучения в отдельном прохождении (точечного радиоисточника) и его переменности от сета к сету (на временах дни—недели);
- 3) поиск переменного радиоизлучения в течение прохождения ДН телескопа (в интервале от 50 мс до нескольких секунд).

Во всех трех случаях сигналы обнаружены не были. Детали реализации этой методики см. в разделе 4.

3. ФОРМАТ ИСХОДНЫХ ЗАПИСЕЙ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Целью обработки записей данного цикла наблюдений было выявление изменений статистических свойств сигнала при прохождении источника через ДН антенны. Изменения оценивались по

отношению к таким же интервалам до и после прохождения, поэтому важно точно определить время их начала и окончания.

Измерения вариации координат положения максимума по сильным опорным источникам показали, что вклад погрешностей, связанных с установкой приемного рупора, шумом, атмосферной рефракцией и временной синхронизацией, не превышает 0.1 с — величины, соизмеримой с периодом дискретизации записи. Несколько большую ошибку вносит смещение каталожного значения прямого восхождения исследуемых звезд за счет собственного движения (μ_α), которое было учтено. Вычисленные величины времен задержек прохождения сигнала через фокальный центр для восточного TIMEESH и западного TIMEWSH рабочих рупоров включены в заголовочный файл F-файла системы сбора данных. Хотя эти значения в единицах звездного времени исходно являются оценочными, мы использовали их, поскольку наблюдаемые звезды расположены довольно далеко от полюса и смещения моментов прохождения максимумов ДН не превышают десятков секунд. Таким образом, в наших наблюдениях можно пренебречь неравномерностью временной шкалы при пересчете в угловое положение. Также в интервалах анализа для расчета были взяты следующие параметры: LAMBDA — центральная длина волны; AZIMUTH — азимут наблюдения; OBSRA — прямое восхождение источника по эфемеридам с учетом инструментальных поправок, а также поправок за нутацию и прецессию (исключая собственное движение); OBSDEC — склонение; XBFWHM — прогнозируемая ширина временного интервала прохождения источника через ДН антенны на уровне половинной мощности.

Результирующий временной сдвиг момента прохождения через максимум ДН для каждого канала регистрации определяется по следующей формуле:

$$ts_\lambda = TS + \Delta T0_\lambda - \frac{0.018 \mu_\alpha}{15 \cos(\text{OBSDEC} \times \pi/180)}. \quad (1)$$

В выражение (1) вводится 18-й год наблюдений относительно координат RA (J2000) с переводом размерности значений из угловых секунд в секунды времени. Величина TS принимает значение TIMEESH или TIMEWSH (со знаком «+» или «−») в зависимости от азимута и расположения рупора в ориентации трехзеркальной системы наблюдения (см. таблицу 1). Поправка $\Delta T0_\lambda$ учитывает инструментальную задержку прохождения рабочего рупора через фокальную линию и определяется по данным наблюдений опорных источников. В результате получаем следующие формулы для расчета средних моментов времени анализируемых

участков записи:

$$t0_{\lambda} = 3600 \text{ OBSRA} - 3 \text{ XBFWM}_{\lambda} + ts_{\lambda}, \quad (2)$$

$$t1_{\lambda} = 3600 \text{ OBSRA} + \text{XBFWM}_{\lambda} + ts_{\lambda}, \quad (3)$$

$$t2_{\lambda} = 3600 \text{ OBSRA} + 3 \text{ XBFWM}_{\lambda} + ts_{\lambda}, \quad (4)$$

где обозначения 0, 1 и 2 соответствуют сегментам записи до прохождения объекта через ДН, во время прохождения и после него. Очевидно, что начальный и конечный моменты анализа получаются вычитанием и прибавлением к расчетным центрам значения полуширины ДН антенны: XBFWM_{λ} . Совокупность этих величин и исходные многочастотные файлы записей наблюдений образуют входной массив информации для программного пакета, построенного на основе системы обработки данных FADPS (Verkhodanov et al., 1993).

4. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ

Для обработки данных наблюдений использовался метод дисперсионного анализа на основе теста Фишера (Cramér, 1999). В его рамках проводилось сравнение статистических свойств наборов различных выборочных дисперсий для записей антенной температуры на разных длинах волн с временным разрешением около 50 мс (длительность дискрета) в сегментах до, во время и после прохождения объекта через ДН телескопа со средними моментами регистрации $t0_{\lambda}$, $t1_{\lambda}$, $t2_{\lambda}$ соответственно.

Для каждой длины волны в каждом сете наблюдений основной является процедура сопоставления с помощью критерия Фишера выборочных дисперсий для сегмента 1 (содержащего гипотетический радиоисточник) и их оценок в сегментах 0 и 2 (контрольных записях соседних областей неба). При этом проверяется гипотеза о принадлежности данных выборок к одной генеральной совокупности. В случае ее отвержения — при значимом превышении выборочной дисперсии сегмента 1 над дисперсиями сегментов 0 и 2 — делается вывод об обнаружении у объекта радиоизлучения. Если гипотеза не отвергается, что свидетельствует об отсутствии радиоизлучения, устанавливается верхний предел для его переменной интенсивности с использованием среднего квадратического отклонения σ на уровне значимости 1 % на временной шкале от 50 мс до несколько секунд (половина длительности прохождения). Необходимо подчеркнуть, что ограничение, полученное при максимальном временном разрешении, является мажорантой для таковых на больших временах (реальные пределы здесь меньше в $\sqrt{n}$, где n — число дискретов). В соответствии с t -распределением на том же уровне значимости определяется верхний порог радиоизлучения, усредненный по всему прохождению; он задает

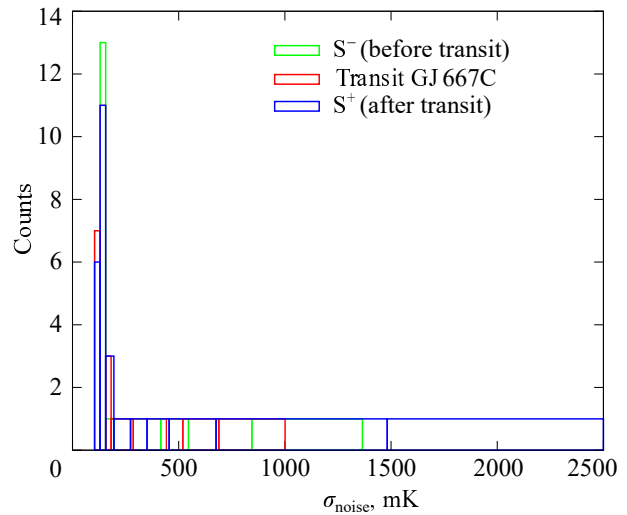


Рис. 1. Гистограмма распределения плотности вероятности стандартного отклонения (σ , мК) для выборки из 26 наблюдений GJ 667C на длине волны 13.33 см. Разным цветом показаны данные для разных сегментов (подробнее см. текст).

предел обнаружения точечного радиоисточника. Отметим, что с помощью критерия Фишера проводится сравнение выборочных дисперсий в двух контрольных сегментах (0 и 2) отдельной записи. Отвержение нулевой гипотезы о принадлежности этих выборок к одной генеральной совокупности (то есть одна дисперсия значительно превышает другую) свидетельствует о локальном увеличении интенсивности в выборке с большей дисперсией, обусловленном помехой наземного или атмосферного происхождения. В этом случае соответствующий сегмент записи исключается из дальнейшего анализа и выделяется как аномальный.

В то же время даже при отсутствии таких очевидных аномалий определение выборочных дисперсий контрольных выборок (сегменты 0 и 2) в записи отдельного наблюдательного сета имеет ряд особенностей, требующих специального обсуждения. Как показывают многочисленные наблюдения на РАТАН-600, регистрация практически с любыми приемниками отягощена земными и атмосферными помехами разной интенсивности и временной структуры, что приводит к аномально высоким значениям выборочных дисперсий записей и смещениям центров их распределений. С другой стороны, используемый при обработке тест Фишера наиболее эффективен для нормальных исходных распределений шума. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведено типичное распределение 26 выборочных среднеквадратических отклонений записей антенных температур, которое является асимметричным и содержит немалое количество выбросов этих оценок. Таким образом, для корректного проведения дисперсионного анализа данных необхо-

дима очистка контрольных выборок — исключение тех из них, в которых выборочная дисперсия аномально велика. Эта методика (цензурирование выборки данных) разработана на основе анализа особенностей измерений в различных областях прикладных (физических, химических, биологических и др.; Bulashev, 2003). Она используется при работе с неизвестными распределениями и базируется на нескольких ранговых статистиках, сочетание которых позволяет определять центры таких распределений, защищенные от аномальных выбросов, а также устанавливать границы выборок, где совокупность данных обретает улучшенные статистические свойства. Отметим, что этот подход носит полуэмпирический характер, однако, будучи протестированным в большом объеме экспериментальных работ, широко применяется в различных областях науки и техники.

Итак, в нашем случае выборками, подлежащими цензурированию, являются последовательности среднеквадратических отклонений σ в контрольных сегментах (0 и 2) записей прохождений для наборов (от 2 до 26) сетов наблюдений данного объекта на различных волнах. После определения центров X_{center} распределений избранных оценок σ в этих выборках как медианного среднего из пяти оценок центров — медианы, центра 50%-го интерквантильного промежутка (центра сгибов), среднего арифметического по всей выборке, среднего арифметического по 50%-му интерквантильному промежутку и центра размаха (между минимальным и максимальным значениями выборки) — запись считалась неискаженной помехами (Bulashev, 2003), если выполнялось условие:

$$X_{\text{center}} - G\tilde{\sigma} \leq \sigma \leq X_{\text{center}} + G\tilde{\sigma}. \quad (5)$$

Коэффициент цензурирования G рассчитывается по эмпирической формуле:

$$G = 1.55 + 0.8 \lg(N/10)\sqrt{\epsilon - 1}. \quad (6)$$

Здесь N — размер выборки, $\tilde{\sigma}$ — оценка стандартного отклонения от X_{center} , а ϵ — оценка эксцесса. Значения σ , лежащие вне интервала (5), исключаются. Вместо них для сравнения с выборочной дисперсией сегмента 1 записи, содержащего объект, используется оценка дисперсии X_{center}^2 , защищенная от выбросов. Возможность такой замены определяется с помощью теста Фишера: проверяется принадлежность оценок выборочных дисперсий для контрольных выборок и межвыборочных дисперсий для набора сетов наблюдений к одной генеральной совокупности с доверительной вероятностью 99%.

Ключевые этапы обработки записи показаны на схеме рис. 2. Ниже приведена их последовательность, реализуемая для каждого объекта.

1. Преобразование многочастотного файла данных в набор одночастотных одноканальных файлов.
2. Выбор частотного диапазона для обработки результатов.
3. Попарно-поэлементное сложение отсчетов в записях с двумя противоположными фазами модуляции (mod A и mod B на рис. 2).
4. Исключение участков записи с калибровочным шумом генератора и последующее вычитание из выделенной ее части базового уровня и линейного тренда для снижения влияния медленной составляющей температурного тренда и атмосферного шума на результирующую статистику.
5. Выделение из полученных файлов трех сегментов записи согласно выражениям (2)–(4) с продолжительностью и количеством отсчетов, соответствующих времени прохождения точечным источником удвоенной ширины (на уровне 0.5 мощности) горизонтального размера ДН телескопа.
6. Определение среднего значения $\tilde{x}$ и стандартного отклонения σ антенной температуры для каждого сегмента.
7. Сравнение значений σ анализируемых областей для принятия или отвержения 0-гипотезы о равенстве этой статистики в разных сегментах по критерию Фишера.
8. Выделение аномалии (помехи), если нулевая гипотеза при сравнении дисперсий контрольных выборок (сегменты 0 и 2) отвергается с вероятностью 0.99.
9. Повтор набора процедур 1–7 для всех сетов наблюдений. Следует еще раз отметить, при цензурировании исключаются только контрольные сегменты записей до или после прохождения источника через ДН, в которых дисперсия аномальна из-за помех.
10. Определение верхнего предела вариаций антенной температуры в сегменте прохождения объекта с использованием оценки выборочной дисперсии в предположении ее χ^2 -распределения.
11. Оценка верхнего предела среднего на интервале прохождения с вероятностью 0.99 в предположении его t -распределения.
12. Повтор всех процедур для разных объектов и длин волн.

Заметим, что вычисления каждого из циклов являются независимыми и поэтому могут быть легко распараллелены. Для того чтобы перевести полученные результаты анализа из единиц антенной температуры в спектральную плотность потока, были использованы наблюдения мощных калибровочных источников, близких по высоте к чаще всего исследовавшимся объектам: 3C 48, 3C 138, 3C 147, 3C 161, J1154–35 (PKS 1151–348), QSO B0237–2322

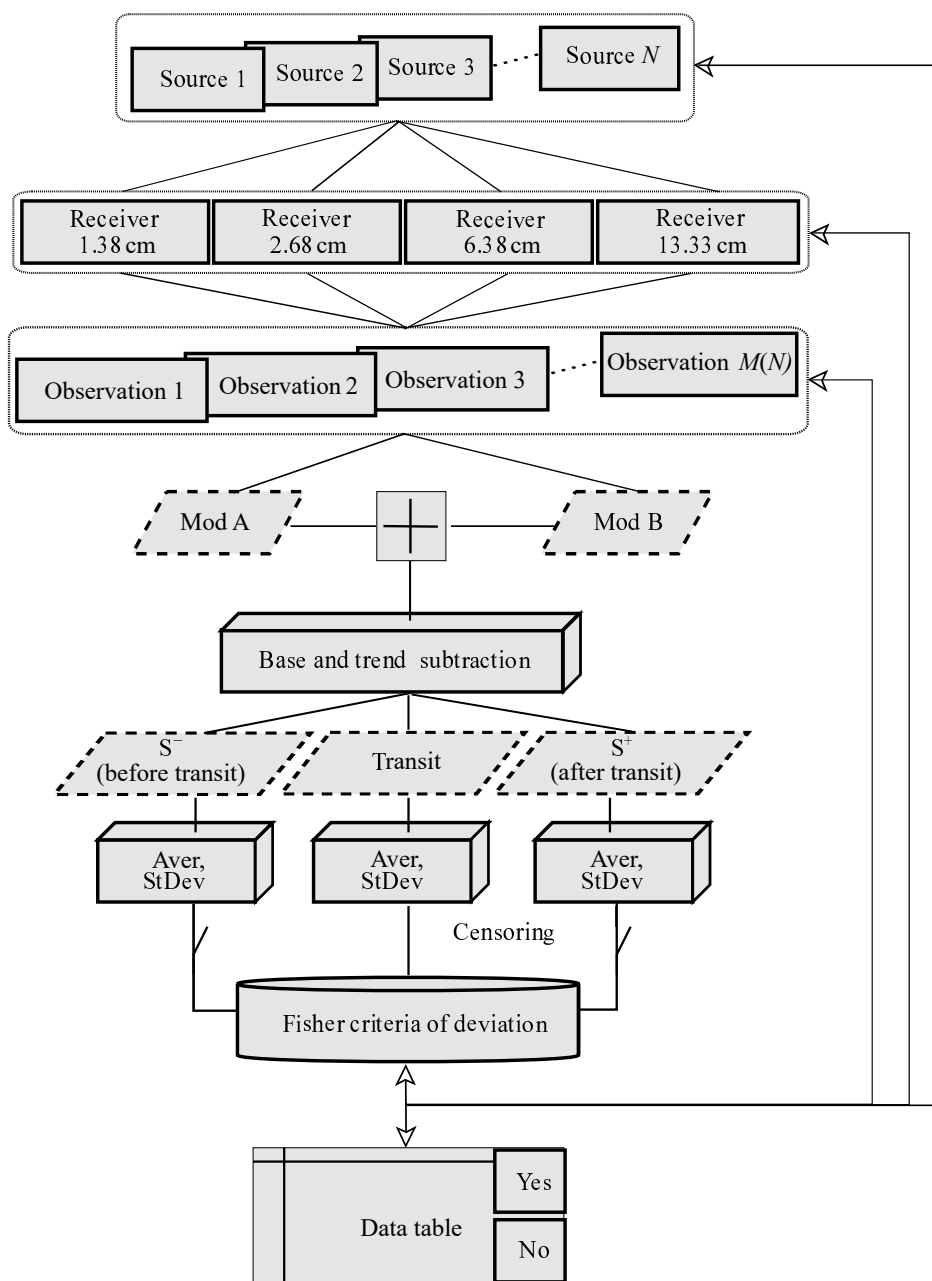


Рис. 2. Конвейер обработки данных.

(NVSS J024026–230835), 3C 286, 4C +12.50, 3C 295, JCM TLSP J184956.9–010106, NGC 7027. Для расчета использовались опубликованные данные, собранные в базе данных CATS⁵⁾ (Verkhodanov et al., 2009). Метод калибровки не отличался от стандартного, основанного на расчете эффективной площади антенны с построением ее зависимости от высоты установки, и описан, например, в работе Panov et al. (2019).

⁵⁾www.sao.ru/cats; доступ на 28 октября 2024.

5. ОБЪЕКТЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Далее мы приводим краткое описание наблюдавшихся звезд, некоторые результаты их наблюдений в радио- и других диапазонах, а также особенности планет, обращающихся вокруг них. В сводной таблице A1 (см. Приложение) для сравнения приведены основные параметры исследованных нами объектов, взятые из различных источников.

Таблица 2. Параметры импульсов в записях отдельных объектов. В столбцах указаны: (1) — инструментальное название источника, SIMBAD-идентификатор наблюдаемой звезды с экзопланетой; (2) — дата наблюдения; (3) — центральная длина волны приемника; (4) — звездное время центра импульса; (5) — амплитуда; (6) — полуширина; (7) — интегральная площадь

Объект	Дата, дд/мм/гггг	Центральная длина волны, см	Звездное время центра, чч:мм:сс.с	Амплитуда, мК	Полуширина, с	Интегральная площадь, К × с
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
0144–1556, τ Cet	07/04/2018	2.68	01:44:53.61 ± 0.01	124.87 ± 28.50	0.0913 ± 0.0125	0.0121
		6.38	01:44:51.81 ± 0.02	58.77 ± 9.84	0.201 ± 0.018	0.0126
0428–2510, GJ 3293	09/04/2018	6.38	04:29:17.43 ± 0.01	97.36 ± 1.42	1.299 ± 0.011	0.1347
			04:29:18.29 ± 0.01	122.9 ± 4.2	0.439 ± 0.009	0.0574
1145–0000, K2-9b	20/04/2018	13.33	11:46:04.08 ± 0.01	3522 ± 43	0.283 ± 0.002	1.0616
			11:46:04.94 ± 0.01	14 183 ± 23	0.5276 ± 0.0005	7.965

5.1. τ Cet

Звезда τ Cet спектрального класса G8 V имеет следующие характеристики: звездную величину $V = 3^m50$, показатель цвета $V - R = 0^m62$, эффективную температуру $T_{\text{eff}} = 5333 \pm 99$ K, радиус $R = 0.83 R_{\odot}$, светимость $L = 0.51 L_{\odot}$ (Stassun et al., 2019). Расстояние до объекта — 3.65 пк (Wenger et al., 2000). Период вращения звезды составляет $32^d.9$ – $34^d.5$ (Pizzolato et al., 2003; Watson et al., 2011), ее яркость менялась в полосах $V(3^m2$ – $4^m)$ и $I_c(2^m7$ – $3^m)$ с 1961 по 2024 г., при этом вспышек значительной амплитуды не было обнаружено⁶⁾ (Maehara, 2014). В рентгеновском диапазоне (0.2–12 кэВ) у τ Cet зарегистрировано переменное излучение с вариациями потока от 10^{-15} до 10^{-12} мВт м⁻² (Quintin et al., 2024). В диапазоне 0.3–8 кэВ поток составляет 1.24×10^{-13} эрг см⁻² с⁻¹ (Wang et al., 2016). В радиодиапазоне на частотах 4.9 и 15.0 ГГц получены верхние пределы потока излучения — 1.0 мЯн и 11.7 мкЯн соответственно, а на частоте 34.5 ГГц излучение зафиксировано на уровне 25.3 мкЯн (Fomalont and Sanders, 1989; Villadsen et al., 2014). Вокруг τ Cet обнаружено⁷⁾ четыре планеты земного типа. Две из них расположены на внутренней и внешней границах зоны жизни, их индексы подобия Земле (ESI) составляют 0.7 и 0.77 (Dietrich and Arai, 2021).

Сама звезда (Judge et al., 2004) перемещается с $\mu_{\alpha} = -1721.94$ мсдгод⁻¹, поэтому необходимо учитывать смещение RA в положении каретки. Высота составляет около 30° над горизонтом, из-за

чего вероятен захват помех от наземных источников: грозовых облаков, самолетов. Мы наблюдали 2 дня, из которых наиболее примечательным было 07/04/2018. Импульс приходился на начальную область прохождения по диаграмме на 2.68 см, его гауссова аппроксимация приведена в таблице 2.

Длительность импульса составляет чуть больше двух отсчетов при плотности потока в пике не менее 434 мЯн, что превышает 5σ вне прохождения (80.5 мЯн). Примечательно, что выброс также наблюдается и в канале приемника с центральной длиной волны 6.38 см, с интервалом по звездному времени менее секунды (см. таблицу 2). Здесь плотность потока импульса составляет 229 мЯн, что больше 3σ (74 мЯн), а длительность достигает четырех отсчетов.

Отметим, что 7 апреля, несмотря на грозу, ожидавшихся помех грозовой природы на длине волны 13.3 см не было. Так, σ в прохождении 07/04/2018 составила 141 мК, а 09/04/2018 — 743 мК. Таким образом, из наземных помех наиболее вероятен пролет самолета. Однако в этом случае природа широкополосных свойств импульса остается неясной. Ни 07/04/2018, ни 09/04/2018 не было импульсов, сопоставимых с диаграммой по ширине. В результате, как и для других объектов (см. в таблице 3), установлены ограничения на уровни вспышечного и стационарного излучения в наиболее чувствительных диапазонах (2.7 и 6.4 см) для плотности потока и светимости. Для вспышек длительностью 0.05 с эти ограничения составляют 82 и 100 мЯн, а светимость в полосе достигает около 10^{24} эрг с⁻¹.

5.2. GJ 3293

Объект спектрального класса M2.5 имеет звездную величину $V = 11^m96$, $V - R = 0^m33$,

⁶⁾ <https://www.aavso.org/webobs>; доступ на 28 октября 2024 года.

⁷⁾ См. информацию на сайте: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

расстояние до объекта — 20.21 пк (Wenger et al., 2000), $T_{\text{eff}} = 3469$ К, $R = 0.45 R_{\odot}$, $L = 0.03 L_{\odot}$ (Stassun et al., 2019). Период вращения звезды составляет $41^{\text{d}}\text{--}50^{\text{d}}$ (Astudillo-Defru et al., 2017a; Engle and Guinan, 2023), ее яркость с 2012 по 2024 г. менялась в полосах $V(10^{\text{m}}7\text{--}12^{\text{m}}3)$ и $I_c(9^{\text{m}}6\text{--}9^{\text{m}}8)$ (Maehara, 2014). Вокруг GJ 3293 обнаружено четыре планеты, одна из которых находится в зоне жизни с $\text{ESI} = 0.63^4$. Собственное движение звезды составляет $\mu_{\alpha} = -87$ мсд год $^{-1}$ (Soubiran et al., 2018). Наблюдения проводились в течение трех дней — с 07/04 по 09/04/2018. Высота объекта над горизонтом достигала 21° , поэтому вероятность захвата земных помех ДН антенны также очень высока. Наиболее примечательным оказался третий день наблюдений: на длине волны 6.38 см, в зоне прохождения ДН, за счет пилообразного импульса зафиксировано увеличение σ шумовой температуры. Параметры аппроксимации этого импульса двумя гауссианами представлены в таблице 2.

Если импульс радиоизлучения не является помехой, то плотность его потока незначительно превышает 2σ фонового шума.

5.3. GJ 180

Объект спектрального класса M3 V, $V = 10^{\text{m}}90$, $V - R = 1^{\text{m}}02$. Расстояние до объекта 11.95 пк (Wenger et al., 2000), $T_{\text{eff}} = 3556$ К, $R = 0.41 R_{\odot}$, $L = 0.03 L_{\odot}$ (Stassun et al., 2019). Период вращения звезды определен в пределах $53^{\text{d}}\text{--}71^{\text{d}}$ (Shan et al., 2024); ее яркость с 2005 по 2024 г. изменялась в полосе V от $10^{\text{m}}9$ до $12^{\text{m}}5$ (Drake et al., 2009; Maehara, 2014), при этом были зарегистрированы вспышки амплитудой не более 1^{m} (Maehara, 2014). По данным наблюдений в диапазоне 0.2–2.3 кэВ светимость объекта составляет 7.45×10^{19} Вт; излучение в радиодиапазоне не обнаружено. У звезды три экзопланеты 7), две из которых, с $\text{ESI} = 0.70$ и 0.48, расположены в зоне жизни 4). Звездная система GJ 180 (Feng et al., 2020) имеет параметр собственного движения $\mu_{\alpha} = 408$ мсд год $^{-1}$ (Brown et al., 2018). Нами наблюдалось три прохождения; аномальных увеличений σ не выявлено.

5.4. GJ 273

Основные характеристики GJ 273 следующие: спектральный класс M3.5 V, $V = 9^{\text{m}}87$, $V - R = 1^{\text{m}}17$, расстояние до объекта 3.79 пк (Wenger et al., 2000), $T_{\text{eff}} = 3382$ К, $R = 0.32 R_{\odot}$, $L = 0.01 L_{\odot}$ (Astudillo-Defru et al., 2017b; Stassun et al., 2019). Период вращения звезды составляет около 100 суток (Astudillo-Defru et al., 2017b); ее

яркость с 2010 по 2024 г. изменялась в полосе V от $9^{\text{m}}6$ до $10^{\text{m}}5$, при этом всплеск не зарегистрировано (Maehara, 2014). В диапазоне 0.2–2 кэВ объект имеет светимость 6.62×10^{19} Вт (Foster et al., 2022); радиоизлучение на частотах от 74 МГц до 4.9 ГГц отсутствовало (Condon et al., 1994). Вокруг GJ 273 обнаружены две экзопланеты, одна из которых, с $\text{ESI} = 0.85$, расположена в зоне жизни 4). Звезда Лейтена (Vyssotsky, 1943) движется со скоростью $\mu_{\alpha} = 572$ мсд год $^{-1}$ (Brown et al., 2018). Мы наблюдали 26 прохождений без какого-либо значимого увеличения σ шума.

5.5. K2-18

K2-18 — звезда спектрального класса M2.5, $V = 13^{\text{m}}50$, $V - R = 0^{\text{m}}26$, расстояние — 38.1 пк (Wenger et al., 2000), $\mu_{\alpha} = -87.377$ мсд год $^{-1}$ (Brown et al., 2018), $T_{\text{eff}} = 3457$ К, $R = 0.45 R_{\odot}$, $L = 0.03 L_{\odot}$ (Benneke et al., 2019). Период вращения звезды составляет $39^{\text{d}}63$ (Sarkis et al., 2018). Ее блеск с 2005 по 2024 г. изменялся в полосах $V(11^{\text{m}}3\text{--}12^{\text{m}}4)$ и $I_c(12^{\text{m}}95\text{--}13^{\text{m}}87)$, были зарегистрированы вспышки амплитудой до $1^{\text{m}}6$ (Drake et al., 2009; Maehara, 2014). Данные о рентгеновском излучении отсутствуют, радиоизлучение не зарегистрировано (Condon et al., 1994; Becker et al., 1995; Watson et al., 2011). Около K2-18 обнаружены две экзопланеты 7), одна из которых, с $\text{ESI} = 0.70$, находится в зоне жизни 4). Недавние исследования планеты K2-18 b с помощью телескопа JWST (Wogan et al., 2024; Madhusudhan et al., 2025), позволили провести поиск биосигнатурного газа в ее атмосфере и изучить его состав.

Источник 2MASS J11301676+0733404 ($m_g = 15^{\text{m}}5$), а также квазар QSO B1127+078 (113017.3818+073213.0294 (J2000), $m_K = 14^{\text{m}}6$), расположенный ниже по δ на $2'$, могут попасть в ДН РАТАН-600. На длине волны 6.38 см вертикальная полуширина диаграммы в этом случае составляет около 2° . Это могло повлиять на определение верхнего предела обнаружения плотности потока радиоизлучения от самой звезды. Обработка 26 записей показала, что без сжатия ($dt = 0.054$ с) значения σ для большинства дней — до, во время и после прохождения ДН — практически идентичны по критерию Фишера с вероятностью более 95%. Исключением является запись от 20/04/2018, где на последнем интервале анализа был обнаружен помеховый выброс на длине волны 6.38 см длительностью 0.375 с, значительно меньшей полуширины диаграммы, и интенсивностью 4σ от фонового шума. На длине волне 1.38 см выявлены аномальные дни — 07/04

и 03/05/2018, когда значение σ при прохождении увеличилось в 1.3 и 1.8 раза соответственно. Гипотеза о помехах из-за путаницы подтверждается сравнением изменений выборок σ при прохождении ДН антенны для приемников 1.38 и 6.38 см (рис. 3). В канале приемника с длиной волны 6.38 см наложение помех значительно больше, и, несмотря на пропорционально больший размер горизонтального сечения диаграммы, длительность помехового импульса остается весьма короткой, что также характерно и для орбитального спутника, пересекающего ДН антенны.

5.6. K2-9

K2-9 имеет спектральный класс M2.5 V, $V = 15^m 84$, $V - R = 0^m 51$, расстояние — 82.96 пк (Wenger et al., 2000), $T_{\text{eff}} = 3528$ K, $R = 0.32 R_{\odot}$, $L = 0.02 L_{\odot}$ (Stassun et al., 2019). Период вращения звезды находится в диапазоне $17^d 55 - 23^d 9$ (Engle and Guinan, 2023); ее яркость с 2005 по 2013 г. в полосе V составляла $14^m 84 \pm 0^m 03$ (Drake et al., 2009), при этом всплеск значительной амплитуды не зарегистрировано. Радиоизлучение не обнаружено (Watson et al., 2011), данные по рентгеновскому излучению отсутствуют. У K2-9 есть одна экзопланта⁷⁾ с $\text{ESI} = 0.70$, расположенная в зоне жизни⁴⁾. Источник, отождествленный в каталоге 2MASS (J11450348+0000190; Kirkpatrick, 2003), движется с $\mu_{\alpha} = -170.752$ мсдгод⁻¹. Нами наблюдалось 19 прохождений. Во время прохождения 2018/04/20 в диапазоне 13.3 см была зарегистрирована помеха в виде двойного импульса, параметры аппроксимации которого приведены в таблице 2.

Поскольку форма помехи хорошо укладывается в сильно сжатый по времени участок ДН со смещением от фокуса, скорее всего, это отклик на пролет самолета в ближней зоне телескопа. В случае непомерной природы плотность потока первого импульса составляет примерно 0.55 Ян, а второго — около 51 Ян. На длине волны 1.38 см при прохождении 3 мая 2018 г. значение σ шума увеличилось в 1.44 раза.

5.7. Wolf 1061

Wolf 1061 — одиночная звезда типа BY Dra со спектральным классом M3 V, $V = 10^m 07$, $V - R = 1^m 16$, расстояние — 4.31 пк (Wenger et al., 2000), $\mu_{\alpha} = -94.212$ мсдгод⁻¹ (Brown et al., 2018), $T_{\text{eff}} = 3309$ K, $R = 0.32 R_{\odot}$, $L = 0.01 L_{\odot}$ (Stassun et al., 2019). Периоды вращения звезды составляют 95^d и 119^d (Astudillo-Defru et al., 2017b; Díez Alonso et al., 2019); ее яркость с 2011 по 2024 г. в полосах V , B и I_c имела значения

$10^m 14 \pm 0^m 11$, $11^m 59 \pm 0^m 26$ и $7^m 48 \pm 0^m 09$ соответственно, при этом всплеск не зарегистрировано (Drake et al., 2009). В диапазоне 0.2–2 кэВ светимость звезды составляла около 3.52×10^{19} Вт (Foster et al., 2022), а в диапазоне 4–8 ГГц — менее 6.7×10^{11} эрг с⁻¹ ГГц⁻¹ (Ceballos et al., 2024). Вокруг Wolf 1061 были обнаружены три экзопланеты⁷⁾, одна из которых, с $\text{ESI} = 0.80$, находится в зоне жизни⁴⁾. На PATAH-600 мы наблюдали 27 прохождений. На длине волны 13.33 см 09/04 и 26/04/2018 значение σ шума увеличилось в 1.7 и 3 раза соответственно. Во втором случае это, скорее всего, не связано с исследуемым источником. На волне 6.38 см 07/04/2018 зафиксировано аномальное повышение шума до 1.84σ в прохождении, что превосходит критерий Фишера для нулевой гипотезы (вероятность 0.99).

5.8. GJ 667C

Объект со спектральным классом M1.5 V имеет следующие характеристики: $V = 10^m 22$, $V - R = 0^m 17$, расстояние — 7.24 пк (Wenger et al., 2000), $\mu_{\alpha} = 1129.76$ мсдгод⁻¹ (Brown et al., 2018), $T_{\text{eff}} = 4819$ K (Stassun et al., 2019), $R = 0.52 R_{\odot}$, $L = 0.13 L_{\odot}$ (Turnbull, 2015). Период вращения звезды составляет $103^d 9$ (Suárez Mascareño et al., 2015). В диапазоне 0.2–2 кэВ светимость звезды равна 6.48×10^{20} Вт (Foster et al., 2022). Верхний предел радиосветимости на частотах 4–8 ГГц достигает 2.1×10^{12} эрг с⁻¹ ГГц⁻¹ (Ceballos et al., 2024). Вокруг GJ 667C⁷⁾ обнаружено пять экзопланет, три из которых имеют $\text{ESI} = 0.80, 0.60, 0.76$ и находятся в зоне жизни⁴⁾. На PATAH-600 наблюдалось 26 прохождений. Высота всего 11° над горизонтом. Сильные помехи на 13.33 см были зафиксированы 11, 12, 18, 22 и 30 апреля 2018 г. Для получения однородных выборок при радиометрических измерениях на длине волны 13.33 см применялось цензурирование данных. Других аномальных событий в ходе наблюдений не выявлено.

5.9. Kepler-62

Kepler-62 имеет спектральный класс G5, $V = 13^m 80$, $V - R = 0^m 18$, расстояние 301 пк (Wenger et al., 2000), $\text{pm_RA} = -25.15$ мсдгод⁻¹ (Brown et al., 2018), $T_{\text{eff}} = 4842$ K, $R = 0.73 R_{\odot}$, $L = 0.26 L_{\odot}$ (Stassun et al., 2019). Периоды вращения звезды составляют $29^d 90$ и $35^d 99$ (Mazeh et al., 2015; Angus et al., 2018) ее блеск изменялся в полосах V , R и I от $13^m 7$ до $14^m 4$ с 2004 по 2024 г. За этот же период зарегистрировано более 150 всплесков, амплитуда которых не превышала

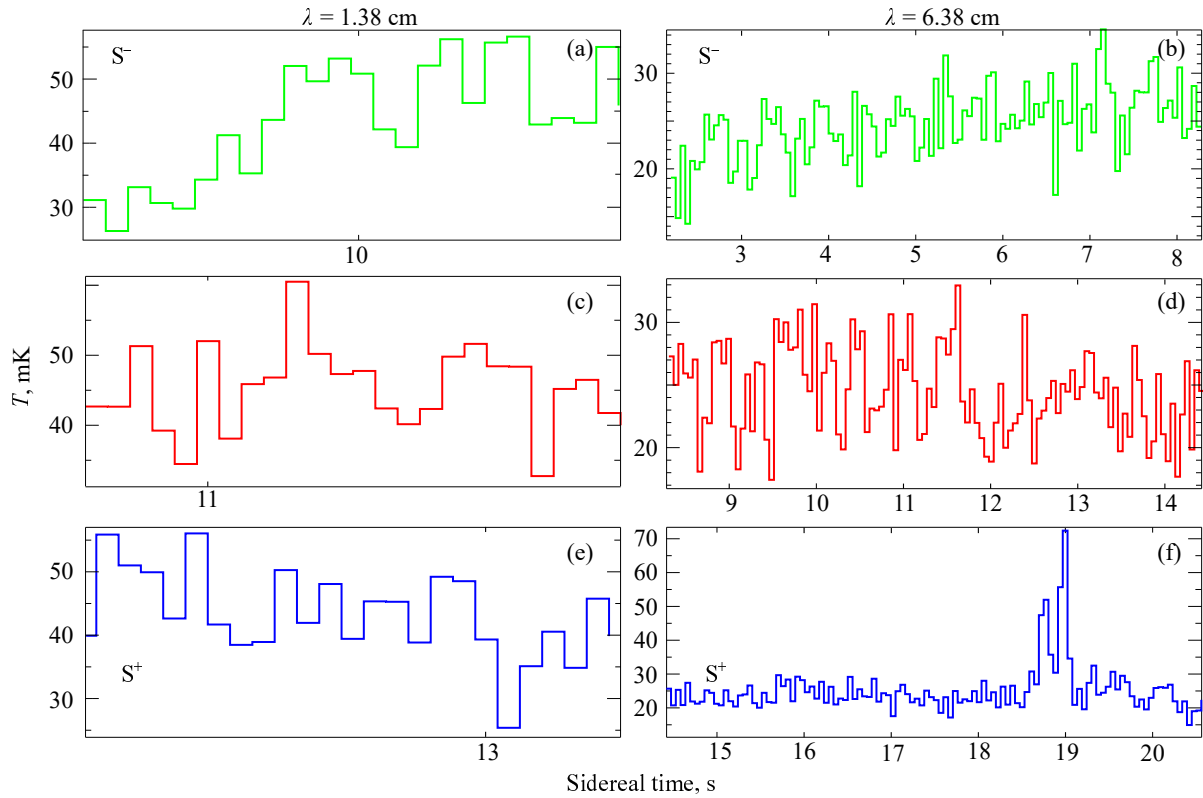


Рис. 3. Выборки вариаций σ по 26 записям звезды K2-18 (1139+0735) на длинах волн 1.38 см (панели (a), (c), (e)) и 6.38 см (панели (b), (d), (f)). Графики сверху вниз показывают изменения в выборках σ до, во время и после прохождения через ДН антенны. На панели (f) видно сильное влияние на оценку σ записи аномального контрольного участка без цензурирования.

$0^{\text{m}}5$ (Pollacco et al., 2006; Drake et al., 2009; Blomme et al., 2011; Masci et al., 2018; Bromley et al., 2021; Hart et al., 2023). Возле Kepler-62 обнаружено пять экзопланет⁷⁾, две из которых, с $\text{ESI} = 0.83$ и 0.68 , находятся в зоне жизни⁴⁾. На ПАТАН-600 за шесть проходов не было обнаружено аномального увеличения σ шума.

5.10. Kepler-296

Объект со спектральным классом M2 V, $V = 16^{\text{m}}45$, $V - R = 0^{\text{m}}64$, расстояние — 220 пк (Wenger et al., 2000), $\mu_{\alpha} = 2$ мсд год⁻¹ (Brown et al., 2018), $T_{\text{eff}} = 3544$ K (Brown et al., 2018), $R = 0.37R_{\odot}$ (Morton et al., 2016), $L = 0.03L_{\odot}$ (Torres et al., 2015). Периоды вращения звезды определены как $35^{\text{d}}86$ и $39^{\text{d}}36$ (McQuillan et al., 2013; Walkowicz and Basri, 2013). Изменение яркости звезды с 2009 по 2024 г. в фотометрических полосах, близких к V , R и I , не превысило $0^{\text{m}}2$ (Masci et al., 2018). За тот же период было зарегистрировано 25 всплесков малой амплитуды (Bromley et al., 2021). Вокруг Kepler-296 обнаружено пять экзопланет⁷⁾, две из которых имеют $\text{ESI} = 0.85$ и 0.66 и находятся в зоне жизни⁴⁾. В ходе наблюдений на ПАТАН-600 за шесть проходов источника

через ДН аномальных увеличений σ шума не зафиксировано.

5.11. Kepler-22

Kepler-22 имеет спектральный класс G5, $V = 11^{\text{m}}81$, $V - R = 0^{\text{m}}17$, расстояние — 198 пк (Wenger et al., 2000), $\mu_{\alpha} = -39.7$ мсд год⁻¹ (Brown et al., 2018), $T_{\text{eff}} = 5596 \pm 61$ K, $R = 0.87R_{\odot}$ (Bonomo et al., 2023), $L = 0.65L_{\odot}$ (Stassun et al., 2019). Периоды вращения звезды определены как $19^{\text{d}}25$ и $25^{\text{d}}22$ (Angus et al., 2018; Santos et al., 2021). Изменение яркости звезды в период с 2005 по 2024 г. в полосах, близких к V и R , не превысило $0^{\text{m}}2$ (Blomme et al., 2011; Hart et al., 2023), однако было зарегистрировано 64 маломощных всплеска (Bromley et al., 2021). Вокруг Kepler-22 вращается одна планета в зоне жизни с $\text{ESI} = 0.72$ ⁴⁾. В ходе наблюдений на ПАТАН-600 за шесть проходов через ДН аномальных увеличений σ шума не выявлено.

5.12. Kepler-1552

Kepler-1552 имеет спектральный класс K2.5 V, $V = 14^{\text{m}}72$, $V - R = 0^{\text{m}}10$, расстояние — 770 пк

(Wenger et al., 2000), $\mu_\alpha = 7$ мсд год⁻¹ (Gaia Collab., 2020), $T_{\text{eff}} = 4871 \pm 107$ К, $R = 1.11 R_\odot$, $L = 0.63 L_\odot$ (Stassun et al., 2019). Период вращения звезды составляет 16^d94 (Angus et al., 2018). Изменение ее блеска в период с 2009 по 2024 г. в фотометрических полосах, близких к B , V и R , не превысило 0^m2 (Pollacco et al., 2006; Masci et al., 2018; Bromley et al., 2021; Gaia Collab., 2022; Hart et al., 2023). Вспышек значительной амплитуды не обнаружено, за исключением одного события с амплитудой 3^m48 в полосе RP по данным Gaia (Gaia Collab., 2022). Вокруг Kepler-1552 найдена одна экзопланета с $\text{ESI} = 0.7$, которая находится в зоне жизни⁴). Звезда наблюдалась в шести прохождении на РАТАН-600. Аномалия была зарегистрирована 09/04/2018 приемником на длине волны 1.38 см: значение σ шума в прохождении увеличилось в два раза. В диапазоне 2.68 см увеличение составило 1.3 раза.

5.13. Kepler-61

Kepler-61 — спектральный класс M0 V, $V = 15^m17$, $V - R = 0^m11$, расстояние — 341 пк (Wenger et al., 2000), $\mu_\alpha = -2.255$ мсд в год (Gaia Collab., 2020), $T_{\text{eff}} = 4148$ К, $R = 0.70 R_\odot$, $L = 0.13 L_\odot$ (Stassun et al., 2019). Периоды вращения звезды составляют 17^d12 (Reinhold et al., 2013) и 59^d88 (Kirk et al., 2016), изменения блеска с 2004 по 2024 г. в полосах, близких к V и R , не превысили 0^m05 (Pollacco et al., 2006; Masci et al., 2018; Bromley et al., 2021; Hart et al., 2023). Согласно данным телескопа «Кеплер» (Bromley et al., 2021), зафиксировано около 100 вспышек малой амплитуды. На внутреннем краю зоны жизни находится планета с $\text{ESI} = 0.72^7$) (Ballard et al., 2013). На РАТАН-600 наблюдалось 26 прохождений. Аномальное увеличение σ шума в диапазоне 1.38 см в 1.5 раза было обнаружено 02.05.2018.

5.14. Kepler-1229

Объект спектрального класса M1 V, $V = 16^m23$, $V - R = 0^m40$, расстояние — 268 пк (Wenger et al., 2000), $\mu_\alpha = 21.6$ мсд год⁻¹ (Gaia Collab., 2020), $T_{\text{eff}} = 3774$ К, $R = 0.57 R_\odot$, $L = 0.06 L_\odot$ (Stassun et al., 2019), период вращения — 17^d63 (Torres et al., 2017). Изменение яркости звезды с 2006 по 2024 год в полосах, близких к B , V и R , не превысило 0^m07 (Pollacco et al., 2006; Masci et al., 2018; Bromley et al., 2021; Gaia Collab., 2022; Hart et al., 2023). По данным наблюдений телескопа «Кеплер» было зафиксировано около 70 вспышек малой амплитуды (Bromley et al., 2021). Кроме того, в наблюдениях миссии

Gaia (Gaia Collab., 2022) зарегистрированы две мощные вспышки: одна с амплитудой менее 3^m, а другая — более 4^m. Радиоизлучение Kepler-1229, оцененное на основе независимой (Condon et al., 1994, 1998; Becker et al., 1995; Intema et al., 2017; Hurley-Walker et al., 2019), статистически не превышает фоновых флуктуаций. У звезды обнаружена одна планета⁷) в зоне жизни с $\text{ESI} = 0.62^4$). На РАТАН-600 наблюдалось 27 прохождений; 26/04/2018 отмечено аномальное увеличение σ шума (в 1.6 раза) в диапазоне 1.38 см.

5.15. K2-72

K2-72 имеет спектральный класс M2 V, $V = 15^m04$, $V - R = 0^m78$, расстояние — 67 пк (Wenger et al., 2000), $\mu_\alpha = 195.855$ мсд в год, $T_{\text{eff}} = 3498 \pm 157$ К, $R = 0.33 R_\odot$, $L = 0.02 L_\odot$ (Stassun et al., 2019), период вращения — 38^d47. Изменения блеска звезды с 2005 по 2024 год в полосах, близких к V и R , не превысили 0^m05 (Bromley et al., 2021; Drake et al., 2009; Hart et al., 2023); зарегистрировано шесть вспышек малой амплитуды и одна с амплитудой 0^m9 в полосе V . Система K2-72 включает четыре экзопланеты, одна из которых, с $\text{ESI} = 0.87$, расположена вблизи внутренней границы зоны жизни⁴). На РАТАН-600 наблюдалось шесть прохождений. Аномальных увеличений σ шума не зафиксировано.

5.16. TRAPPIST-1 или K2-112

TRAPPIST-1 или K2-112 (маломассивная звезда, M7.5e): $V = 18^m80$, $V - R = 2^m33$, расстояние — 13 пк (Wenger et al., 2000), $\mu_\alpha = 890$ мсд год⁻¹ (Cutri et al., 2003), $T_{\text{eff}} = 2566$ К, $R = 0.12 R_\odot$, $L = 0.0006 L_\odot$ (Agol et al., 2021), период вращения — 1^d40 (Gillon et al., 2016). По данным Drake et al. (2009), изменения блеска звезды с 2005 по 2013 г. в полосе V составили $\pm 0^m350$; зафиксирована вспышка на величину в 4^m6. С 2016 по 2017 г. в полосе K_p блеск находился на уровне $12^m917 \pm 0^m355$ (Huber et al., 2016), при этом была зафиксирована вспышка амплитудой 3^m7. По данным Ceballos et al. (2024), в полосе частот 4–8 ГГц верхний предел светимости составил 6.7×10^{11} эрг с⁻¹ Гц⁻¹. Интенсивность рентгеновского излучения звезды равна 1.04×10^{-14} в диапазоне 0.3–10 кэВ (Evans et al., 2020) и 2.00×10^{-14} мВт м⁻² в полосе 0.2–12 кэВ (Quintín et al., 2024). Возле TRAPPIST-1 обнаружено семь планет⁷), четыре из них, с $\text{ESI} = 0.91, 0.85, 0.68$ и 0.58, расположены в зоне жизни⁴). На РАТАН-600

наблюдалось шесть проходов. Аномальных увеличений σ шума не выявлено.

Таблица 3 показывает результаты наблюдений всех 16 объектов нашей выборки.

Значения цензурированной оценки верхних пределов плотности потока, полученные с помощью алгоритма, описанного в предыдущей главе, рас-

считываются по нулевой гипотезе с вероятностью 0.99 и калиброваны по эталонным источникам с указанием ошибок оценки (столбец (6)). Из-за слишком большого шума радиометров на длинах волн 1.38 и 13.3 см в столбцах (7), (8), (9) и (10) приведены верхние пределы только в наиболее чувствительных диапазонах.

Таблица 3. Наблюдения в апреле–мае 2018 г. В столбцах таблицы указаны: (1) — инструментальное название источника, SIMBAD-идентификатор наблюдаемой звезды с экзопланетой; (2) — расстояние до звезды в парсеках и метрах D ; (3) — количество наблюдаемых проходов N ; (4) — центральная длина волны полосы приемника в сантиметрах; (5) — время прохождения источника в направлении прямого восхождения через ДН антенны в секундах звездного времени; (6) — количество временных отсчетов данных n за время прохождения источника через диаграмму; (7) — верхний предел плотности потока $F_s \times 10^{29}$ источника в мЯн ($1 \text{ мЯн} = 10^{-29} \text{ Вт Гц}^{-1} \text{ м}^{-2}$); (8) — значение верхнего предела P_s спектральной плотности мощности в предположении изотропности излучения источника согласно $P_s = 4\pi D^2 F_s$; (9) — указан верхний предел постоянной изотропной светимости звезды L_s в сантиметровом диапазоне микроволн, усредненный за все время наблюдения; (10) — то же, что в столбце (9), но усредненное по одной записи прохождения источника — L_{st} ; (11) — верхний предел L_{sf} переменной компоненты светимости звезды на временах от 50 мс до нескольких секунд; (12) — дата обнаружения аномалии для источника на данной длине волны приемника согласно ранее описанному алгоритму

Source, Star	D , pc, m	N	λ , cm	ΔT , s	n	$F_s \pm \sigma_{F_s}$, mJy	P_s , W Hz $^{-1}$	L_s , erg s $^{-1}$	L_{st} , erg s $^{-1}$	L_{sf} , erg s $^{-1}$	Date
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
0144–1556, τ Cet	3.652, 1.13E17	2	1.38 2.68 6.38 13.33	1.54 2.96 7.12 14.86	26 51 122 256	650 ± 32 82.0 ± 4.1 100.0 ± 5.0 1500 ± 90	1.3E8 1.6E8	1.1E23 6.1E22	1.5E23 8.7E22	1.1E24 9.6E23	07/04/2018
0428–2510, GJ 3293 (L 591–6)	20.207, 6.24E17	3	1.38 2.68 6.38 13.33	1.68 3.26 7.8 16.3	28 56 134 281	520 ± 26 94.0 ± 4.7 130.0 ± 6.7 570.0 ± 3.4	4.6E9 6.4E9	2.9E24 1.9E24	4.9E24 3.3E24	3.7E25 3.8E25	09/04/2018
0453–1746, GJ 180 (L 736–30)	11.949, 3.69E17	3	1.38 2.68 6.38 13.33	1.56 3.04 7.24 15.14	26 52 124 261	480 ± 24 100.0 ± 5.0 100.0 ± 5.2 120 ± 74	1.7E9 1.7E9	1.1E24 5.2E23	1.9E24 9.0E23	1.4E25 1.0E25	
0727+0513, GJ 273 (BD +05 1668)	3.786, 1.17E17	26	1.38 2.68 6.38 13.33	1.34 2.6 6.18 12.94	23 44 106 223	420 ± 21 96.0 ± 4.8 100.0 ± 5.1 960 ± 48	1.7E8 1.7E8	3.8E22 1.9E22	2.0E23 9.7E22	1.3E24 1.0E24	
1130+0735, K2-18	38.1, 1.18E18	26	1.38 2.68 6.38 13.33	1.32 2.58 6.14 12.84	22 44 105 221	390 ± 20 91.0 ± 4.5 94.0 ± 4.7 800 ± 40	1.6E10 1.6E10	3.8E24 1.9E24	2.0E25 9.7E24	1.3E26 9.9E25	07/04/2018 03/05/2018
1145+0000, K2-9 (LP 613–39)	82.96, 2.56E18	19	1.38 2.68 6.38 13.33	1.36 2.64 6.32 13.22	23 45 108 227	420 ± 21 110.0 ± 5.3 100.0 ± 5.0 850 ± 43	9.1E10 8.2E10	2.5E25 1.1E25	1.0E26 4.7E25	7.2E26 4.9E26	03/05/2018 20/04/2018
1630–1239, Wolf 1061 (BD –12 4523)	4.308, 1.33E17	27	1.38 2.68 6.38 13.33	1.48 2.9 6.9 14.44	25 50 118 248	480 ± 24 97.0 ± 4.9 87.0 ± 4.3 620 ± 31	2.2E8 1.9E8	4.6E22 2.1E22	2.4E23 1.1E23	1.7E24 1.2E24	07/04/2018 04/09/2018
1718–3459, GJ 667C (HD 156384C)	7.243, 2.23E17	26	1.38 2.68 6.38 13.33	1.88 3.66 8.74 18.28	32 63 150 315	530 ± 27 120.0 ± 6.0 90.0 ± 4.5 640 ± 32	7.5E8 5.6E8	1.5E23 5.4E22	7.6E23 2.8E23	6.0E24 3.4E24	

Таблица 3. (Продолжение)

Source, Star	D , pc, m	N	λ , cm	ΔT , s	n	$F_s \pm \sigma_{F_s}$, mJy	P_s , W Hz ⁻¹	L_s , erg s ⁻¹	L_{st} , erg s ⁻¹	L_{sf} , erg s ⁻¹	Date
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1852+4520, Kepler-62	301.1, 9.29E18	6	1.38 2.68 6.38 13.33	1.5 2.92 6.96 14.54	25 50 120 250	470 ± 24 140.0 ± 7.0 110.0 ± 5.5 600 ± 30	1.5E12 1.2E12	6.9E26 2.7E26	1.7E27 6.6E26	1.2E28 7.2E27	
1906+4926, Kepler-296	219.6, 6.78E18	6	1.38 2.68 6.38 13.33	1.66 3.22 7.68 16.06	28 55 132 276	680 ± 34 140.0 ± 6.9 120.0 ± 6.1 620 ± 31	8.1E11 6.9E11	3.6E26 1.5E26	8.8E26 3.7E26	6.5E27 4.2E27	
1916+4753, Kepler-22	197.5, 6.1E18	6	1.38 2.68 6.38 13.33	1.6 3.1 7.4 15.46	27 53 127 266	580 ± 29 140.0 ± 7.0 130.0 ± 6.3 510 ± 25	6.5E11 6.1E11	2.9E26 1.3E26	7.1E26 3.9E26	5.2E27 3.6E27	
1926+3852, Kepler-1552	769.5, 2.37E19	6	1.38 2.68 6.38 13.33	1.38 2.68 6.4 13.36	23 46 110 230	680 ± 34 120.0 ± 6.1 110.0 ± 6.1 710 ± 35	8.5E12 7.8E12	4.1E27 1.8E27	1.0E28 4.5E27	6.8E28 4.7E28	09/04/2018 09/04/2018
1941+4228, Kepler-61	341.3, 1.05E19	26	1.38 2.68 6.38 13.33	1.42 2.78 6.6 13.84	24 47 113 238	490 ± 25 130.0 ± 6.7 110.0 ± 4.5 760 ± 38	1.8E12 1.5E12	4.0E26 1.7E26	2.8E27 8.6E26	1.4E28 9.1E27	02/05/2018
1949+4659, Kepler-1229	268.2, 8.28E18	27	1.38 2.68 6.38 13.33	1.56 3.02 7.22 15.1	26 52 124 260	500 ± 25 140.0 ± 7.0 130.0 ± 6.3 760 ± 38	1.2E12 1.1E12	2.6E26 1.2E26	1.3E27 6.0E26	9.6E27 6.7E27	26/04/2018
2218–0936, K2-72 (LP 759-72)	66.51, 2.05E18	6	1.38 2.68 6.38 13.33	1.46 2.82 6.74 14.1	25 48 116 243	480 ± 24 110.0 ± 5.6 95.0 ± 4.7 830 ± 42	5.8E10 5.0E10	2.7E25 1.1E25	6.6E25 2.8E25	4.6E26 3.0E26	
2306–0502, TRAPPIST-1	12.47, 3.85E17	6	1.38 2.68 6.38 13.33	1.4 2.72 6.5 13.6	24 46 112 234	540 ± 27 160.0 ± 8.0 94.0 ± 4.7 570 ± 28	3.0E9 1.8E9	1.4E24 4.2E23	3.5E24 1.8E24	2.4E25 1.1E25	

Для оценки значений столбца (10) использовались следующие соотношения: $L_{st} = L_{sf}/\sqrt{n}$ и $L_s = L_{st}/\sqrt{N}$; $L_{sf} = P_s B$, где B — ширина полосы частот, детектируемых приемником.

Обсудим некоторые особенности приведенных в таблице 3 и упомянутых в описании к ней оценок. Они получены как верхние границы светимости (по определению) источников изотропного излучения, ширина спектра которых (или части его) не превышает ширину полос чувствительности используемых в наблюдениях приемников. Реальное ограничение при известном спектре будет ниже или выше в зависимости от меньшей или большей ширины спектра источника относительно ширины полос приема соответственно.

С другой стороны, в случае анизотропии излучения реального источника (например, в джете, в

струе выброшенной плазмы) его мощность будет существенно ниже оценки верхних пределов светимости, рассчитанной по измеренным значениям плотности потока. Эта редукция определяется отношением телесного угла, в котором распространяется направленное излучение, к полному телесному углу 4π небесной сферы. Сказанное относится ко второй задаче нашей работы — поиску признаков/следов гипотетических внеземных цивилизаций на планетах у наблюдавшихся карликов. Очевидно, что в этом случае для оценки верхних пределов мощности сигналов ВЦ, направленных к Земле (подробнее об этой стратегии см. доклад В. А. Котельникова в сборнике Gindilis, 1965, а также работу Panov et al., 2019), необходимо использовать некие предположения о способе их трансляции. Представляется естественным рассматривать те-

лескоп обсерватории Аресибо (к сожалению, прекративший работу) как аналог передающей системы ВЦ, тем более что он уже использовался в этом качестве (Послание Аресибо⁸⁾, 1974 год).

Излучение радиотелескопа в активном режиме радара (радиолокация тел Солнечной системы, послание ВЦ) характеризуется величиной эффективной изотропно излучаемой мощности (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP), рассчитываемой по формуле $EIRP = P \times G$. Здесь P — мощность передатчика, $G = k(\pi D/\lambda)^2$ — коэффициент усиления антенны ($k \sim 0.5-0.7$ — коэффициент использования площади, D — диаметр антенны, λ — рабочая длина волны). При этом плотность потока излучения возрастает в G раз за счет его концентрации в направленном пучке (диаграмме направленности) при неизменной полной мощности P , которая для высокоэффективного инструмента близка к мощности передатчика (см. «A Strategy for Active Remote Sensing Amid Increased Demand for Radio Spectrum», глава 8⁹⁾). В частности, телескоп Аресибо (диаметр 300 м, мощность передатчика 1 МВт) был самым мощным планетарным радаром с коэффициентом усиления 5×10^7 . В этом случае полученные нами оценки верхних пределов радиосветимости наблюдавшихся объектов на уровне $10^{22}-10^{27}$ эрг с (таблица 3) соответствуют EIRP. Ограничения на мощность излучения сигнала, направленного на Землю гипотетической цивилизацией с планеты в зоне жизни, составляют, как и мощность внеземного передатчика, $2 \times 10^7-2 \times 10^{12}$ Вт. Нижняя граница этих оценок всего лишь в 20 раз превышает мощность передатчика телескопа Аресибо. Другими словами, при трансляции с помощью передатчика мощностью 10 МВт и антенны диаметром более 500 м (FAST!) сигнал ВЦ был бы нами обнаружен (!).

Таким образом, оценки радиосветимости, полученные на основе верхних пределов плотностей потока и расстояний до объектов, интерпретируются либо как ограничения на естественные радиосветимости (изотропные!) в отсутствии а priori информации о структуре излучения, либо как ограничения на мощность искусственного сигнала, направленного в сторону Солнечной системы.

6. ВЫВОДЫ

В апреле–мае 2018 г. на радиотелескопе РАТАН-600 были проведены мониторинговые наблюдения 16 звезд солнечного типа с планетами,

чьи орбиты локализованы в зонах жизни, а индексы подобия Земле лежат в диапазоне 0.6–0.9. Для регистрации радиоизлучения использовались радиометры четырех диапазонов: 1.38, 2.68, 6.38 и 13.33 см, с повышенной частотой дискретизации около 18 Гц. Затем была выполнена обработка наблюдательных данных и анализ результатов мониторинга. Информацию, полученную в режиме прохождения источника через ДН антенны, обрабатывали с помощью алгоритма, основанного на дисперсионном анализе с цензурированием помех. При этом учитывалась коррекция времени прохождения за вековой сдвиг прямого восхождения источников из-за их относительной близости. Было обнаружено одиннадцать неопознанных событий аномального превышения стандартного отклонения шума от стационарных значений. Для наиболее чувствительных приемников в диапазонах 2.68 и 6.38 см амплитуда таких событий составила примерно 100 мЯн с вероятностью 99%. Анализ природы этих аномалий указывает на их помеховое и/или земное (грозы, самолеты, спутники) происхождение. После исключения аномальных событий верхние пределы плотности потока для переменности на шкале 0.05 с составили 80–150 мЯн (микроволновая светимость — $10^{24}-10^{29}$ эрг с⁻¹, а светимость стационарного состояния — $10^{23}-10^{28}$ эрг с⁻¹). При этом радиоизлучение от наблюдаемых звезд не обнаружено. По всей видимости, отсутствие активности в радиодиапазоне свидетельствует о низком уровне связанного с ней энерговыделения в коронах этих звезд, которое может представлять опасность для экзопланетной биоты. Тем не менее остается возможность реализации нестационарных явлений в солнцеподобных звездах, которые проявляются в генерации высокочастотного излучения и космических лучей, препятствующих возникновению и сохранению жизни на их планетных системах. Для изучения подобных эффектов необходимы исследования в других диапазонах, в том числе оптическом. Следует отметить, что ограничения на светимость радиоизлучений разной продолжительности могут распространяться и на сигналы ВЦ, обитающих на планетах вблизи изучаемых звезд. В этом случае можно утверждать, что мощность гипотетических передатчиков ВЦ не превышает $2 \times 10^7-2 \times 10^{11}$ Вт.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

⁸⁾https://en.wikipedia.org/wiki/Arecibo_message

⁹⁾<https://nap.nationalacademies.org/read/21729/chapter/8>

Таблица А1. Основные параметры исследованных звезд. В столбцах таблицы указаны: (1) — название объекта; (2) — спектральный класс; (3) — звездная величина; (4) — показатель цвета; (5) — расстояние, которое взято из Wenger et al. (2000); (6) — собственное движение; (7) — период вращения; (8) — эффективная температура; (9) — радиус; (10) — светимость

Object	Sp	V , mag	$V - R$, mag	r , pc	μ_α , mas yr ⁻¹	P_{rot} , day	$T_{\text{eff}} \pm \sigma$, K	R , $R_\odot$	L , $L_\odot$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
τ Cet	G8 V	3.50	0.62	3.65	-1721.94 [1]	32.9–34.5 [2, 3]	5333 $\pm$ 99	0.83	0.51 [4]
GJ 3293	M2.5	11.96	0.33	20.21	-87 [5]	41–50 [6, 7]	3469	0.45	0.03 [4]
GJ 180	M3 V	10.90	1.02	11.95	408 [8]	53–71 [9]	3556	0.41	0.03 [4]
GJ 273	M3.5 V	9.87	1.17	3.79	572 [8]	100 [10]	3382	0.32	0.01 [4, 10]
K2-18	M2.5	13.50	0.26	38.1	-87.377 [8]	39.63 [11]	3457	0.45	0.03 [12]
K2-9	M2.5 V	15.84	0.51	82.96	-170.752 [13]	17.55–23.9 [7]	3528	0.32	0.02 [4]
Wolf 1061	M3 V	10.07	1.16	4.31	-94.212 [8]	95, 119 [10, 14]	3309	0.32	0.01 [4]
GJ 667C	M1.5 V	10.22	0.17	7.24	1129.76 [8]	103.9 [15]	4819 [4]	0.52	0.13 [16]
Kepler-62	G5	13.80	0.18	301	-25.15 [8]	29.90, 35.99 [17, 18]	4842	0.73	0.26 [4]
Kepler-296	M2 V	16.45	0.64	220	2 [8]	35.86, 39.36 [19, 20]	3544 [8]	0.37 [21]	0.03 [22]
Kepler-22	G5	11.81	0.17	198	-39.7 [8]	19.25, 25.22 [17, 23]	5596 $\pm$ 61	0.87 [24]	0.65 [4]
Kepler-1552	K2.5 V	14.72	0.10	770	7 [25]	16.94 [17]	4871 $\pm$ 107	1.11	0.63 [4]
Kepler-61	M0 V	15.17	0.11	341	-2.255 [25]	17.12, 59.88 [26, 27]	4148	0.70	0.13 [4]
Kepler-1229	M1 V	16.23	0.40	268	21.6 [25]	17.63 [28]	3774	0.57	0.06 [4]
K2-72	M2 V	15.04	0.78	67	195.855	38.47	3498 $\pm$ 157	0.33	0.02 [4]
TRAPPIST-1	M7.5e	18.80	2.33	13	890 [29]	1.4 [30]	2566	0.12	0.0006 [31]

Ссылки: [1] — Judge et al. (2004), [2] — Pizzolato et al. (2003), [3] — Watson et al. (2011), [4] — Stassun et al. (2019), [5] — Soubiran et al. (2018), [6] — Astudillo-Defru et al. (2017a), [7] — Engle and Guinan (2023), [8] — Brown et al. (2018), [9] — Shan et al. (2024), [10] — Astudillo-Defru et al. (2017b), [11] — Sarkis et al. (2018), [12] — Benneke et al. (2019), [13] — Kirkpatrick (2003), [14] — Díez Alonso et al. (2019), [15] — Suárez Mascareño et al. (2015), [16] — Turnbull (2015), [17] — Angus et al. (2018), [18] — Mazeh et al. (2015), [19] — McQuillan et al. (2013), [20] — Walkowicz and Basri (2013), [21] — Morton et al. (2016), [22] — Torres et al. (2015), [23] — Santos et al. (2021), [24] — Bonomo et al. (2023), [25] — Gaia Collab. (2020), [26] — Kirk et al. (2016), [27] — Reinhold et al. (2013), [28] — Torres et al. (2017), [29] — Cutri et al. (2003), [30] — Gillon et al. (2016), [31] — Agol et al. (2021).

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность дирекции САО РАН за выделение наблюдательного времени телескопа РАТАН-600 из резерва. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты». В настоящей работе использовались сведения из астрономической базы данных SIMBAD (<https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН в части «Проведение фундаментальных научных исследований».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Agol, C. Dorn, S. L. Grimm, et al., *Planetary Science Journal* **2** (1), id. 1 (2021). DOI:10.3847/PSJ/abd022
2. A. K. Althukair and D. Tsiklauri, *Research in Astronomy and Astrophysics* **23** (10), id. 105010 (2023). DOI:10.1088/1674-4527/acee51
3. R. Angus, T. Morton, S. Aigrain, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **474** (2), 2094 (2018). DOI:10.1093/mnras/stx2109
4. N. Astudillo-Defru, X. Delfosse, X. Bonfils, et al., *Astron. and Astrophys.* **600**, id. A13 (2017a). DOI:10.1051/0004-6361/201527078
5. N. Astudillo-Defru, T. Forveille, X. Bonfils, et al., *Astron. and Astrophys.* **602**, id. A88 (2017b). DOI:10.1051/0004-6361/201630153
6. S. Ballard, D. Charbonneau, F. Fressin, et al., *Amer. Astron. Soc. Meeting* **221**, id. 407.07 (2013).
7. V. M. Batyrshinova and M. A. Ibragimov, *Astronomy Letters* **27**, 29 (2001). DOI:10.1134/1.1336859
8. R. H. Becker, R. L. White, and D. J. Helfand, *Astrophys. J.* **450**, 559 (1995).
9. B. Benneke, I. Wong, C. Piaulet, et al., *Astrophys. J.* **887** (1), article id. L14 (2019). DOI:10.3847/2041-8213/ab59dc
10. A. B. Berlin, N. A. Nizhelsky, P. G. Cybulev, et al., *Transactions of IAA RAS* **24**, 183–186 (2012).
11. G. M. Beskin, V. N. Chernenkov, and N. N. Bursov, *arXiv e-prints astro-ph:2303.01791* (2023). DOI:10.48550/arXiv.2303.01791
12. J. Blomme, L. M. Sarro, F. T. O'Donovan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **418** (1), 96 (2011). DOI:10.1111/j.1365-2966.2011.19466.x
13. A. S. Bonomo, X. Dumusque, A. Massa, et al., *Astron. and Astrophys.* **677**, id. A33 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202346211
14. B. C. Bromley, A. Leonard, A. Quintanilla, et al., *Astron. J.* **162** (3), id. 98 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/ac05be
15. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A1 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201833051
16. A. S. Brun and M. K. Browning, *Living Reviews in Solar Physics* **14** (1), article id. 4 (2017). DOI:10.1007/s41116-017-0007-8
17. S. V. Bulashev, *Statistics for Traders* (Company Sputnik+, Moscow, 2003) [in Russian].
18. K. N. O. Ceballos, Y. Cendes, E. Berger, and P. K. G. Williams, *Astron. J.* **168** (3), 127 (2024). DOI:10.3847/1538-3881/ad58be
19. A. Collier Cameron, “*Extrasolar Planetary Transits*” in *Methods of Detecting Exoplanets: 1st Advanced School on Exoplanetary Science*, Ed. by V. Bozza, L. Mancini, and A. Sozzetti (Springer International Publishing, Switzerland, 2016), p. 89–131. DOI:10.1007/978-3-319-27458-4_2
20. J. J. Condon, J. J. Broderick, G. A. Seielstad, et al., *Astron. J.* **107**, 1829 (1994). DOI:10.1086/116992
21. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astron. J.* **115** (5), 1693 (1998). DOI:10.1086/300337
22. H. Cramér, *Mathematical Methods of Statistics*, (Princeton University Press, Princeton, 1999).
23. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. van Dyk, et al., *VizieR Online Data Catalog II/246* (2003).
24. J. Dietrich and D. Apai, *Astron. J.* **161** (1), id. 17 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/abc560
25. E. Diez Alonso, J. A. Caballero, D. Montes, et al., *Astron. and Astrophys.* **621**, id. A126 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201833316
26. A. J. Drake, S. G. Djorgovski, A. Mahabal, et al., *Astrophys. J.* **696** (1), 870 (2009). DOI:10.1088/0004-637X/696/1/870
27. F. D. Drake, *Physics Today* **14** (4), 40 (1961). DOI:10.1063/1.3057500
28. L. N. Driessen, J. Pritchard, T. Murphy, et al., *Publ. Astron. Soc. Australia* **41**, id. e084 (2024). DOI:10.1017/pasa.2024.72
29. S. G. Engle and E. F. Guinan, *ASP Conf. Ser.* **451**, 285 (2011).
30. S. G. Engle and E. F. Guinan, *Astrophys. J.* **954** (2), id. L50 (2023). DOI:10.3847/2041-8213/acf472
31. J. E. Enriquez, A. Siemion, G. Foster, et al., *Astrophys. J.* **849** (2), article id. 104 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/aa8d1b
32. P. A. Evans, K. L. Page, J. P. Osborne, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **247** (2), id. 54 (2020). DOI:10.3847/1538-4365/ab7db9
33. F. Feng, R. P. Butler, S. A. Shectman, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **246** (1), article id. 11 (2020). DOI:10.3847/1538-4365/ab5e7c

34. E. B. Fomalont and W. L. Sanders, *Astron. J.* **98**, 279 (1989). DOI:10.1086/115143
35. G. Foster, K. Poppenhaeger, N. Ilic, and A. Schwöpe, *Astron. and Astrophys.* **661**, id. A23 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202141097
36. Gaia Collab., *VizieR Online Data Catalog I/350* (2020). DOI:10.26093/cds/vizier.1350
37. Gaia Collab., *VizieR On-line Data Catalog: I/355* (2022). DOI:10.26093/cds/vizier.1355
38. R. E. Gershberg, N. I. Kleorin, L. A. Pustilnik, et al., *arXiv e-prints astro-ph/2411.11898* (2024). DOI:10.48550/arXiv.2411.11898
39. M. Gillon, E. Jehin, S. M. Lederer, et al., *Nature* **533** (7602), 221 (2016). DOI:10.1038/nature17448
40. L. M. Gindilis, *Sov. Astron.* **9**, 369 (1965).
41. K. Hart, B. J. Shappee, D. Hey, et al., *arXiv e-prints arXiv:2304.03791* (2023). DOI:10.48550/arXiv.2304.03791
42. D. Huber, S. T. Bryson, M. R. Haas, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **224** (1), article id. 2 (2016). DOI:10.3847/0067-0049/224/1/2
43. N. Hurley-Walker, P. J. Hancock, T. M. O. Franzen, et al., *VizieR Online Data Catalog: VIII/102* (2019).
44. H. T. Intema, P. Jagannathan, K. P. Mooley, and D. A. Frail, *Astron. and Astrophys.* **598**, id. A78 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201628536
45. O. A. Johnson, V. Gajjar, E. F. Keane, et al., *Astron. J.* **166** (5), id. 193 (2023). DOI:10.3847/1538-3881/acf9f5
46. P. G. Judge, S. H. Saar, M. Carlsson, and T. R. Ayres, *Astrophys. J.* **609** (1), 392 (2004). DOI:10.1086/421044
47. B. Kirk, K. Conroy, A. Prša, et al., *Astron. J.* **151** (3), article id. 68 (2016). DOI:10.3847/0004-6256/151/3/68
48. J. D. Kirkpatrick, *Proc. IAU Symp. No. 211*, Ed. by E. Martín, (ASP, San Francisco, 2003), p. 189. DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0207672
49. A. F. Kowalski, *Living Reviews in Solar Physics* **21** (1), article id. 1 (2024). DOI:10.1007/s41116-024-00039-4
50. N. Madhusudhan, S. Constantinou, M. Holmberg, et al., *Astrophys. J.* **983** (2), id. L40 (2025). DOI:10.3847/2041-8213/adclc8
51. H. Maehara, Japan Aerospace Exploration Agency Research and Development Report **13**, 119 (2014).
52. F. J. Masci, R. R. Laher, B. Rusholme, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131** (995), 018003 (2018). DOI:10.1088/1538-3873/aae8ac
53. L. D. Matthews, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131** (995), 016001 (2019). DOI:10.1088/1538-3873/aae856
54. T. Mazeh, H. B. Perets, A. McQuillan, and E. S. Goldstein, *Astrophys. J.* **801** (1), id. 3 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/801/1/3
55. A. McQuillan, T. Mazeh, and S. Aigrain, *Astrophys. J.* **775** (1), article id. L11 (2013). DOI:10.1088/2041-8205/775/1/L11
56. T. D. Morton, S. T. Bryson, J. L. Coughlin, et al., *Astrophys. J.* **822** (2), article id. 86 (2016). DOI:10.3847/0004-637X/822/2/86
57. A. D. Panov, I. I. Astapov, G. M. Beskin, et al., *Physics of Atomic Nuclei* **84** (6), 1037 (2021). DOI:10.1134/S1063778821130251
58. A. D. Panov, I. I. Astapov, G. M. Beskin, et al., *Astronomy Reports* **69** (5), 433 (2025). DOI:10.1134/S106377292570177X
59. A. D. Panov, N. N. Bursov, G. M. Beskin, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (2), 234 (2019). DOI:10.1134/S1990341319020123
60. N. Pizzolato, A. Maggio, G. Micela, et al., *Astron. and Astrophys.* **397**, 147 (2003). DOI:10.1051/0004-6361:20021560
61. D. L. Pollacco, I. Skillen, A. Collier Cameron, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118** (848), 1407 (2006). DOI:10.1086/508556
62. D. C. Price, J. E. Enriquez, B. Brzycki, et al., *Astron. J.* **159** (3), id. 86 (2020). DOI:10.3847/1538-3881/ab65f1
63. E. Quintin, N. A. Webb, I. Georgantopoulos, et al., *VizieR Online Data Catalog: STONKS Multi-Mission X-ray Catalog* (2024).
64. T. Reinhold, A. Reiners, and G. Basri, *Astron. and Astrophys.* **560**, id. A4 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201321970
65. A. R. G. Santos, S. N. Breton, S. Mathur, and R. A. García, *Astrophys. J. Suppl.* **255** (1), id. 17 (2021). DOI:10.3847/1538-4365/ac033f
66. P. Sarkis, T. Henning, M. Kürster, et al., *Astron. J.* **155** (6), article id. 257 (2018). DOI:10.3847/1538-3881/aac108
67. C. J. Schrijver, *Astronomische Nachrichten* **323**, 157 (2002). DOI:10.1002/1521-3994(200208)323:3/4<157::AID-ASNA157>3.0.CO;2-Q
68. Y. Shan, D. Revilla, S. L. Skrzypinski, et al., *Astron. and Astrophys.* **684**, id. A9 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202346794
69. A. P. V. Siemion, P. Demorest, E. Korpela, et al., *Astrophys. J.* **767** (1), article id. 94 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/767/1/94
70. C. Soubiran, G. Jasiewicz, L. Chemin, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A7 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201832795
71. K. G. Stassun, R. J. Oelkers, M. Paegert, et al., *Astron. J.* **158** (4), article id. 138 (2019). DOI:10.3847/1538-3881/ab3467
72. A. V. Stepanov, *Physics Uspekhi* **46** (1), 97 (2003). DOI:10.1070/PU2003v046n01ABEH001345
73. A. Suárez Mascareño, R. Rebolo, J. I. González Hernández, and M. Esposito, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **452** (3), 2745 (2015). DOI:10.1093/mnras/stv1441
74. J. Tarter, J. Cuzzi, D. Black, and T. Clark, *ICARUS* **42** (1), 136 (1980). DOI:10.1016/0019-1035(80)90251-1

75. G. Torres, S. R. Kane, J. F. Rowe, et al., *Astron. J.* **154** (6), id. 264 (2017). DOI:10.3847/1538-3881/aa984b
76. G. Torres, D. M. Kipping, F. Fressin, et al., *Astrophys. J.* **800** (2), article id. 99 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/800/2/99
77. P. G. Tsybulev, *Astrophysical Bulletin* **66** (1), 109 (2011). DOI:10.1134/S199034131101010X
78. M. C. Turnbull, arXiv e-prints astro/ph:1510.01731 (2015). DOI:10.48550/arXiv.1510.01731
79. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **674**, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940
80. M. P. van Haarlem, M. W. Wise, A. W. Gunst, et al., *Astron. and Astrophys.* **556**, id. A2 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201220873
81. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **36**, 132 (1993).
82. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Data Science Journal* **8**, 34 (2009). DOI:10.2481/dsj.8.34
83. J. Villadsen, G. Hallinan, and S. Bourke, *Amer. Astron. Soc. Meeting* **223**, id. 151.18 (2014).
84. A. N. Vyssotsky, *Astrophys. J.* **97**, 381 (1943). DOI:10.1086/144527
85. L. M. Walkowicz and G. S. Basri, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **436** (2), 1883 (2013). DOI:10.1093/mnras/stt1700
86. S. Wang, J. Liu, Y. Qiu, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **224** (2), article id. 40 (2016). DOI:10.3847/0067-0049/224/2/40
87. C. A. Watson, S. P. Littlefair, C. Diamond, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **413** (1), L71 (2011). DOI:10.1111/j.1745-3933.2011.01036.x
88. M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 9 (2000). DOI:10.1051/aas:2000332
89. N. F. Wogan, N. E. Batalha, K. J. Zahnle, et al., *Astrophys. J.* **963** (1), id. L7 (2024). DOI:10.3847/2041-8213/ad2616

Search for Radio Activity from Solar-Type Dwarfs with Earth-Like Planets in the Centimeter Band Using the RATAN-600 Radio Telescope

G. M. Beskin¹, V. N. Chernenkov¹, N. N. Bursov¹, A. A. Shlyapnikov², and A. D. Panov³

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

We present the results of multi-frequency radio observations of sixteen solar-type dwarfs with Earth-like planets in their habitable zones carried out with the RATAN-600 telescope. In the drift-scan mode, radiometers covering four frequency ranges: 22, 11, 4.7, and 2.3 GHz (1.38, 2.68, 6.38, and 13.33 cm) were used quasi-simultaneously with a sampling rate of about 18 Hz and an exposure duration equal to the beam transit time across the source, between 1.5 and 15 s. Observations were carried out in 3–27 repeats per target in April–May of 2018, and no radio emission was detected. Upper limits were established for flare intensities with durations of 0.05–10 s at levels of 80–800 mJy, corresponding to a luminosity of 10^{24} – 10^{29} erg s^{−1}, and for steady emission up to 10^{23} – 10^{28} erg s^{−1}. During the observations, eleven anomalous flux outliers around 100 mJy have been registered, which are most likely due to instrumental or atmospheric interference (e.g., thunderstorms, aircraft, or satellites). Assuming an artificial origin of the searched radio emission (transmissions from inhabited planets), the upper limits on transmitter power are $2 \times (10^7$ – $10^{12})$ W. The lower end of this range is only about 20 times higher than the transmitter power of the Arecibo telescope.

Keywords: *stars: flares, continuous spectrum radio emission: planetary systems*