

УДК 524.82:520.27; 524.88

НАБЛЮДЕНИЯ ПО ПРОГРАММЕ SETI НА ТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600 В 2015 И 2016 ГГ.

© 2019 А. Д. Панов^{1*}, Н. Н. Бурсов², Г. М. Бескин^{2,3}, А. К. Эркенов², Л. Н. Филиппова⁴, В. В. Филиппов⁴, Л. М. Гиндилис⁵, Н. С. Кардашев⁶, А. А. Кудряшова², Е. С. Стариков⁴, Дж. Вилсон⁷, Л. А. Пустильник⁸

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

² Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³ Казанский (Приволжский) государственный университет, Казань, 420008 Россия

⁴ Научно-культурный центр SETI, Российская академия космонавтики им. К. Э. Циолковского, Москва, 119991 Россия

⁵ Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

⁶ Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 117997 Россия

⁷ Проект SETI@HOME, Нью-Йорк, 14009 США

⁸ Тель-Авивский университет, Тель-Авив, 69978 Израиль

Поступила в редакцию 11 декабря 2018 года; после доработки 15 апреля 2019 года; принята к публикации 15 апреля 2019 года

В 2015–2016 гг. в САО РАН на радиотелескопе РАТАН-600 проводились регулярные наблюдения по программе SETI. Объектами поиска сигналов искусственного происхождения были около 30 солнцеподобных звезд и два шаровых скопления с высокой металличностью. Основной идеей, положенной в основу этих исследований, были многократные повторяющиеся наблюдения (мониторинг) одних и тех же объектов. Данные анализировались тремя способами: проводился поиск одиночного сильного сигнала, оценивался усредненный за все время наблюдений поток излучения, анализировались корреляции сигналов разных частот. Накопление информации за два года наблюдений позволило провести поиск слабых сигналов с уровнем обнаружения в несколько миллионных на волнах 2.7 и 6.3 см. Усредненные по всему набору данных ограничения для мощности сигналов внеземных цивилизаций лежат практически у всех объектов в интервале 10^{16} – 10^{20} Вт, верхние же пределы для светимости в единичных наблюдениях (время прохождения диаграммы 7–19 секунд) составляют 10^{17} – 10^{21} Вт, при этом эффективные изотропные излучаемые мощности их гипотетических передатчиков не превышают 2×10^9 – 2×10^{13} Вт, что близко к данному параметру для крупнейших наземных планетарных радаров. Полученные ограничения на светимость свидетельствуют об отсутствии радиоизлучения собственно и у наблюдавшихся солнцеподобных звезд, стационарного в среднем за время наблюдений и вспышечного в отдельных сеансах.

Ключевые слова: SETI

1. ВВЕДЕНИЕ

Поиски сигналов внеземных цивилизаций (ВЦ) ведутся практически 60 лет. Начиная с пионерских работ Коккони и Моррисона [1] и Дрейка [2], за прошедшее время опубликованы тысячи статей на эту тему, но свидетельства существования внеземного разума все еще не найдены. Характеристикой эффективности поиска является

доля изученного объема многомерного пространства параметров поиска, в котором измерениями являются чувствительность детектора, координаты объекта, несущая частота сигнала, его амплитуда и временная структура (период, скважность и т.д.), ширина полосы частот и поляризация. Размерность пространства и способ оценки исследуемого объема варьируются в зависимости от априорных представлений об искусственном сигнале и стратегии его обнаружения (см., например, [3–5]). В последние несколько лет благодаря появлению

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

проекта «Breakthrough Initiatives»¹ интенсивность исследований по программе SETI существенно возросла, прежде всего в радиодиапазоне [6–8]. Тем не менее по разным оценкам доля изученного объема в пространстве параметров поиска лежит в диапазоне от 5×10^{-26} до 1.5×10^{-18} со средним геометрическим 2.5×10^{-22} [4, 5]. (В проведенный анализ не включены результаты обзоров [9, 10]. Именно они продемонстрировали отсутствие маяков цивилизаций II типа в ближней части Галактики (менее 1 кпк). Можно полагать, что их учет примерно на порядок изменит эту оценку.) Джилл Тартер метафорически прокомментировала приведенные выше цифры [4]: «Coincidentally, the Earth's oceans hold $1.4 \times 10^{18} \text{ m}^3$ of water, or 6×10^{21} cups of water. So our search of the 9-dimensional haystack is equivalent to sampling about 1.6 cups of water from the Earth's oceans. If you were looking for fish instead of extraterrestrial intelligence, I don't think that you would conclude that there are no fish in the ocean after this meager sampling!» Эти соображения обнадеживают, однако сами оценки повергают в уныние — ясно, что никакие усилия не могут существенно их увеличить. Единственная надежда — использовать информацию о местах скопления «рыбы», т.е. ориентироваться на существующие концепции происхождения жизни и возможности достижения ею разумной (цивилизационной) стадии, а также моделируя стратегию установления связи между ВЦ (см. например, [11]), определяя тем самым области пространства поиска с повышенной вероятностью обнаружения внеземной жизни и, возможно, цивилизации.

Очевидно, что такая область естественным образом выделилась после открытия экзопланет [12], а также в результате запуска космического телескопа «Кеплер» [13], обнаружившего несколько тысяч планет у других звезд, в число которых входят несколько десятков земноподобных², расположенных в зоне обитания [14]. Именно эти звезды являются первоочередными объектами в различных программах SETI [8, 15–18]. Причем, как правило, наблюдения проводятся предложенным 50 лет назад классическим методом в гигагерцовом диапазоне («водяная дыра») [19] с частотным разрешением 1–100 Гц, при этом каждый объект экспонируется единожды в течение нескольких минут (см., например, Enriquez et al. [8]). Этот подход опирается на представление о передаче внеземной цивилизации как в первую очередь узкополосном (несвойственном астрофизическим объектам) излучении, предваряющем собственно сообщение, которое будет передаваться после установления

связи (посылки ответа с Земли — «сигнала готовности») [11]. Отметим, что по этой причине столь большой ажиотаж вызывали те редкие случаи регистрации в радиодиапазоне одиночных всплесков непонятного происхождения, например, знаменитого сигнала «WOW!».

Накопленная за последнее время информация позволяет определенным образом обновить наши представления о возможном характере передач ВЦ, а следовательно, изменить стратегию их поиска. Реализации одного из вариантов модифицированной стратегии поиска и посвящена настоящая работа.

2. БАЗОВЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СТРАТЕГИИ ПОИСКА СИГНАЛОВ ВЦ

Прежде всего, пора осознать, что диалог между цивилизациями невозможен. Самые оптимистические оценки их числа, базирующиеся на результатах исследования экзопланет (земноподобных в том числе) и представлениях о длительности технологической стадии цивилизаций дают для расстояний между ними 500–1000 пк [20]. С другой стороны, даже просто наиболее подходящие для возникновения жизни планеты в основном удалены от Солнца на 10–500 пк. Отсюда следует, что передача должна содержать всю информацию, предназначенную для нас, т.е. объем сообщения должен быть максимальным. Согласно теореме Шеннона–Хартли (см. [21]), пропускная способность канала связи пропорциональна ширине диапазона частот, т.е. коль скоро ВЦ предполагает передавать в режиме отсутствия обратной связи, она должна использовать широкополосные сигналы. Ясно, что в этом случае она должна использовать направленные антенны, в диаграмму которых периодически (многократно) входят объекты назначения [22]. Принципиальным моментом в такой стратегии является повторяемость облучения объекта послания, необходимая для увеличения вероятности обнаружения им сигнала ВЦ. Другими словами, мы должны проводить наблюдения возможных источников искусственного излучения многократно в надежде поймать момент (период) передачи. Что же касается критерия искусственности сигнала, то им может являться его сложная (нестандартная, непериодическая) временная структура. Такой способ кодирования представляется более простым и естественным по сравнению с различного рода вариациями частоты и поляризации. Можно при этом отметить, что, поскольку в первую очередь объектами для поиска передач ВЦ являются либо сами земноподобные планеты, либо маяки, с ними связанные, то эффекты замывания временной (и, разумеется, частотной) структуры будут незначительны [15, 23]. В частности, при мере дисперсии

¹<https://breakthroughinitiatives.org>

²<http://ph1.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>

100–200 пк см⁻³, длине несущей волны 6 см и ширине полосы 1 ГГц временное уширение сигнала составит не более 10^{-5} – 10^{-4} с.

В настоящей работе, частично реализующей вышеприведенную стратегию, мы приводим результаты многократных наблюдений в течение 2015–2016 гг. набора солнцеподобных звезд с экзопланетами на РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне. Дополнительная задача, которая решалась в рамках данной программы, — поиск переменного радиоизлучения этих звезд, связанного с их вспышечной активностью. Отметим, что оптические супервспышки, обнаруженные с помощью телескопа «Кеплер» [24], могут сопровождаться переменным радиоизлучением нетепловых частиц. Последние в свою очередь могут оказывать существенное влияние на возможность возникновения и сохранения жизни (разумной в том числе) на планетах у этих звезд [25].

Остановимся несколько подробнее на соображениях, лежащих в основании реализованной программы по поиску сигналов ВЦ. Можно предположить, что, если некоторая космическая цивилизация имеет серьезную склонность к межзвездному общению, тогда она может на очень короткой исторической (или астрономической) шкале времени создать многочастотные и достаточно мощные передатчики для посылки межзвездных сообщений. Однако, если цивилизация не располагает ресурсами энергии, сравнимыми по мощности с излучением их собственной родительской звезды (иными словами, это цивилизация первого типа по Кардашеву [26]), она не может передавать достаточно мощный сигнал во всех направлениях одновременно в силу фундаментальных ограничений по энергии. Следовательно, если говорить о достаточно мощных сигналах типа маяка, которые могут быть легко обнаружены другими цивилизациями, то цивилизация первого типа может только сканировать звезду за звездой. Любой получатель таких сигналов может ожидать только относительно коротких порций сигнала, разделенных длительными периодами молчания. Если только цивилизации второго типа по Кардашеву (энергетика на уровне родительской звезды) не являются очень широко распространенным явлением в нашей Галактике, то, вообще говоря, не следует ожидать непрерывных межзвездных сообщений с высокой мощностью сигнала со стороны звезд-кандидатов SETI. Следовательно, если кто-то провел наблюдения некоторой звезды-кандидата SETI даже очень тщательно, с использованием инструмента высокой чувствительности, но только единожды, и при этом сигналы искусственного происхождения не были обнаружены, то нельзя сделать заключение, что данная звезда не является местом обитания коммуникативной цивилизации. Эта звезда может начать вести переда-

чу в направлении Солнечной системы как раз в тот момент, когда наблюдатель переключит свое внимание на другую звезду-кандидата SETI. Не получив сигнала от звезды после ее одиночного наблюдения, мы эффективно не получаем никакой информации об этой звезде в предположении, что мы ищем цивилизации первого типа.

Из сказанного ясно, что идеальная стратегия SETI состоит в непрерывном мониторинге каждого кандидат SETI или в непрерывных наблюдениях во всех направлениях сразу (желательно с использованием широкого диапазона частот и поиском различных типов модуляции сигнала). К сожалению, это пока невозможно, предполагая достаточно высокую чувствительность приемника. Разумным компромиссом является как можно более частый периодический мониторинг ограниченного списка кандидатов SETI.

Основной идеей, положенной в основу программы, реализованной на телескопе РАТАН-600, был периодический мониторинг ограниченного числа объектов в течение длительного промежутка времени. Этим способом можно ограничить максимальную длительность одиночного сообщения для каждого кандидата: максимальная длительность сообщения не может превышать максимальный зазор во времени между последовательными наблюдениями кандидата. Другим преимуществом программы является возможность накопления сигнала многих последовательных наблюдений одного и того же объекта для детектирования такого слабого сигнала, который не может быть обнаружен в единичном наблюдении.

3. МЕТОДИКА

Наблюдения проводились на Южном секторе кольцевой антенны РАТАН-600 с плоским отражателем и приемо-измерительным комплексом вторичного зеркала «Облучатель № 2». При этом использовалась трехзеркальная схема, где роль главного приемного зеркала играл плоский отражатель, а элементы секторов кольцевой антенны были установлены вертикально и неподвижно. Преимуществом такой схемы является то, что имеется возможность плоский сектор антенны быстро перенаправить так, чтобы можно было провести наблюдения 80–90 источников в день. Недостатками такой схемы являются, во-первых, потеря (рассеяние) энергии на поверхностях зеркал, особенно на коротких волнах, и из-за неточного совмещения фокусов; во-вторых, относительно сильные аберрации на краях поля зрения. В такой системе имеется также относительно высокий вклад в фон излучения земли, который ведет к потере чувствительности по отношению к режиму наблюдений с использованием индивидуальных секторов

телескопа примерно вдвое, особенно для высоких углов восхождения. Наблюдения проводились с помощью радиометра «Эридан-2» с тремя регулярными частотами. После глубокой модернизации устаревшей и неэффективной азотной системы охлаждения комплекс теперь представлен набором теплых (неохлаждаемых) радиометров [27] с характеристиками, представленными в таблице 1.

Радиометры для волн 2.7 и 6.3 см функционировали без потерь, их чувствительность была максимальной (по сравнению с таковым на 1.38 см). В силу этого обрабатывались данные, полученные только с их помощью, причем в широкополосном режиме (см. таблицу 1).

Обработка данных осуществлялась с применением штатного пакета программ FADPS [28]. С использованием данных калибровочных источников 0137 + 33 (3C 48), 0237 – 23, 0521 + 16 (3C 138), 0542 + 49 (3C 147), 0627 – 05 (3C 161), 1154 – 35, 1256 – 05, 1331 + 30 (3C 286), 1347 + 12, 1411 + 52 (3C 295), 1459 + 71 (3C 309.1), 1850 – 01, 2107 + 42 (NGC 7027), представляющих все видимое небо, для волн 2.7 и 6.2 см были построены кривые для коррекции прямого восхождения и для перевода антенных температур в плотности потоков излучения источников.

Перевод амплитуд сигналов источников, выраженных в терминах антенных температур на выходе радиотелескопа, в плотности потоков радиоизлучения источников в мЯн был проведен с использованием данных калибровочных источников за два года наблюдений на Южном секторе телескопа с плоским отражателем. Рисунок 1 показывает калибровочные кривые для пересчета антенных температур в потоки излучения для длины волны 6.2 см. Калибровка не является полностью независимой от времени и была проведена отдельно для 2015 и 2016 гг. Экспериментальные калибровочные кривые аппроксимировались кубическими полиномами, как показано на рис. 1.

4. ОГРАНИЧЕННЫЙ СПИСОК КАНДИДАТОВ SETI И СТАТИСТИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Были использованы следующие критерии для включения объектов в ограниченный список кандидатов SETI для мониторинга:

- Солнцеподобные звезды с известными планетами (число планет указано в скобках): HD 1461 (2+2?), HD 13931 (1), HD 38858 (1), HD 69830 (3), НАТ-Р-43 (1), HD 75732 (5), HD 89307 (1), HD 95128 (3), HD 114783 (1), HD 134987 (2), HD 150433 (1), HD 154088 (1), HD 164595 (1), HD 164922 (2), CoRoT-9 (1), CoRoT-25 (1), Kepler-69 (2);

- Солнцеподобные звезды, близкие к эклиптике: HD 50692, HD 51419, HD 99491, HD 154088, HD 172051, HD 217877 [29];
- Звезды-получатели первых радиопосланий Земли: HD 50692, HD 75732, HD 95128, HD 186408, HD 197076;
- Шаровое скопление NGC 6553 с высокой металличностью (–0.18). Такой уровень металличности близок как к металличности Солнца, так и многих известных звезд с уже открытыми планетами. Расстояния до этого шарового скопления 19 000 св. лет.

Таблица 2 показывает основные свойства звезд и планет-объектов списка. В столбцах содержится следующая информация: (1) — название звезды, главным образом из каталога Henry Draper Catalog [30]; (2) — спектральный класс; (3) — видимая звездная величина центральной звезды; (4) — расстояние до звезды; (5) — масса звезды в солнечных массах; (6) — радиус звезды в солнечных радиусах; (7) — температура звезды; (8) — металличность звезды; (9) — возраст звезды в млрд лет; (10) — число открытых планет, здесь же, если звезда была целью земных межзвездных сообщений, пометка METI (Messaging for Extra Terrestrial Intelligence).

Основные характеристики шаровых скоплений, равно как и звезд, были извлечены из астрономических баз данных [31, 32], баз данных по экзопланетам и других ресурсов Сети [33–38].

Радиотелескоп РАТАН-600 функционирует в транзитном режиме. Это означает, что каждый объект может наблюдаться только один раз в сутки, когда он проходит через диаграмму направленности (ДН) телескопа. Примерное время прохождения для различных длин волн приведено в последней строке таблицы 1. Полная длительность одиночной записи прохождения в окрестности центра записи в типичном случае составляла 2.5 мин. В таблице 3 приведены все объекты наблюдений, координаты каждого объекта, количество прохождений через диаграмму телескопа (число дней его наблюдения), суммарное время накопления сигнала, вычисленное как $t_{\text{sum}} = t_{\text{ndays}} \times t_{\text{obs}}$, где t_{ndays} — количество дней наблюдения, t_{obs} — полное время одного наблюдения.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показаны 65 кривых прохождения калибровочного точечного источника 0542+16 (3C 138) на волне 2.7 см. Записи получены после коррекции по времени за неточность положения облучателя при его перемещении по рельсам и по амплитуде — из-за изменения эффективной

Таблица 1. Основные характеристики радиометров «Эридан-2»

Характеристики радиометров	Длина волны		
	1.4 см	2.7 см	6.3 см
Шумовая температура, К	185	100	60
Ширина полосы, ГГц	2.5	0.8	0.6
Ожидаемая чувствительность для 1 с наблюдений, мК	6.0	5.0	3.5
Время транзита для точечного источника ^a , с	4–5	7–9	12–19

^a Размер диаграммы направленности телескопа по нулевому уровню мощности с учетом аберраций. Значение в интервале определяется наклоном источника.

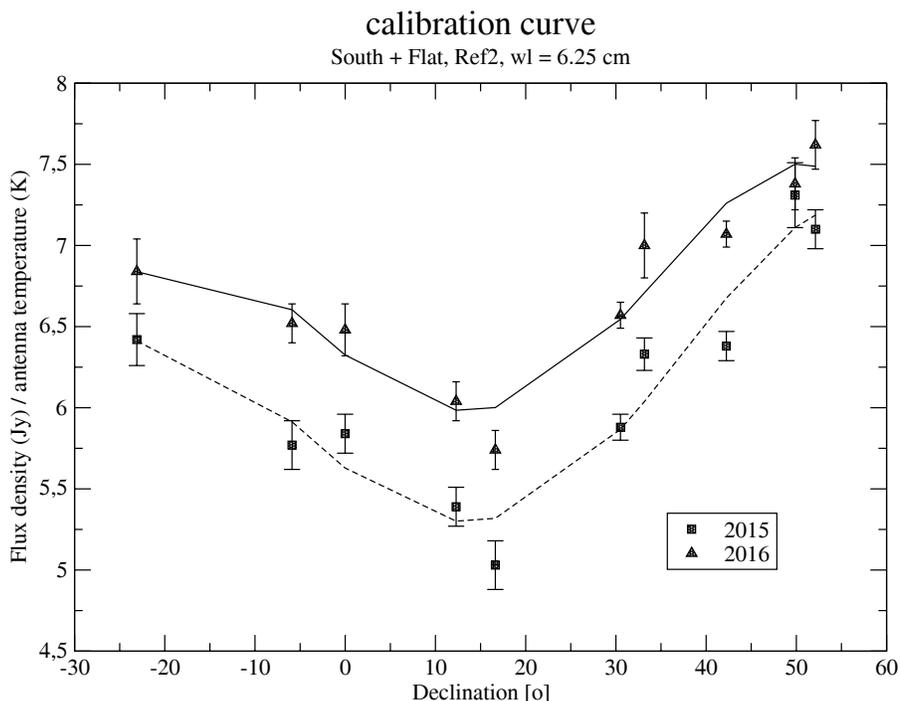


Рис. 1. Калибровочные кривые для перевода антенных температур в потоки излучения для Южного сектора телескопа с плоским зеркалом в 2015 г. (сплошная линия) и 2016 г. (пунктир) для длины волны 6.2 см.

площади сектора антенны и вариаций усиления в радиометрах. Кривые коррекции были получены по ярким источникам из других программ 2015 и 2016 гг. Профили линий передают форму диаграммы направленности телескопа РАТАН-600.

Слева от основного пика виден след от бокового лепестка диаграммы направленности. Ожидается, что источник искусственного происхождения продемонстрирует аналогичную форму сигнала. Если сигнал достаточно силен, он может быть обнаружен в одиночной записи прохождения источника, над фоном, окружающим пик. Пики, отвечающие ожидаемой форме сигнала точно-подобного источника, в одиночных записях кандидатов SETI

ограниченного списка за два года наблюдений обнаружены не были.

Как уже отмечалось, если сигнал некоторого источника существует, но слишком мал для обнаружения в единичном измерении, он все еще может быть обнаружен после накопления по многим записям. Метод накопления был реализован off-line при обработке данных.

При поиске слабых сигналов методом накопления все записи от кандидатов SETI после необходимой предварительной обработки были разделены (для каждого кандидата отдельно) на две группы Sum1 и Sum2 так, чтобы в каждой группе получилась одинаковая величина шума в фоновой области записи (в том месте, где не должен появиться

Таблица 2. Некоторые свойства звезд ограниченного списка кандидатов SETI-объектов исследования с помощью телескопа РАТАН-600

Звезда	Спектральный класс	V_{mag} , m	Расстояние до звезды, пк	M , M_{\odot}	R , R_{\odot}	T , К	Fe/H	Возраст, млрд лет	Число планет
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
HD 1388	G0V	6.50	26.1	1.18	1.11	5952	-0.04	5.6	?
HD 1461	G0V	6.64	23.4	1.14	1.1	5765	0.19	6.3	2
HD 13931	G0	7.61	45.5	1.04	1.23	5829	0.03	6.4	1
HD 38858	G2V	5.97	15.2	1.05	0.93	5723	-0.21	7.5	1
CoRoT-5	F9V	14	400	1.00	1.19	6100	-0.25	6.9	1
HD 50692	G0V	5.74	17.3	0.98	1.08	5891	-0.13	5.5	METI
HD 51419	G5V	6.94	24.2	1.0	0.97	5637	-0.33	4.8	?
HD 69830	G8V	5.95	12.6	0.86	0.91	5385	-0.05	7.0	3
НАТ-P-43	G	13.36	543	1.05	1.10	5645	0.23	5.7	1
HD 75732	G8V	5.95	12.34	0.95	0.94	5196	0.27	7.4	5, METI
HD 89307	G0V	7.06	30.9	1.03	1.05	5950	-0.14	6.76	1
HD 95128	G0V	5.1	13.97	1.08	1.22	5887	0.02	5.5	3, METI
HD 99492	K2V	7.38	18	0.83	0.96	4740	0.36	4.0	1
HD 114783	K0	7.57	20.4	0.92	0.78	5105	0.33	7.8	1
HD 134987	G5V	6.45	22.2	1.07	1.25	5740	0.25	4.4	2
HD 146233	G2Va	5.50	14.0	0.98	1.02	5791	0.03	4.7	?
HD 150433	G0	7.22	29.6	0.91	1.04	5649	-0.22	5.0	1
HD 154088	K0IV	6.58	18.1	0.93	0.94	5409	0.28	6.4	1
HD 157347	G3V	6.28	19.5	1.19	1.02	5714	0.03	5.8	?
HD 164595	G2V	7.1	28.93	0.99	1.04	5790	-0.04	6.3	1
HD 164922	G9V	6.99	22.13	0.95	0.93	5467	0.16	5.2	2
HD 172051	G6V	5.86	13.0	0.93	0.89	5564	-0.24	7.9	?
CoRoT-25	G0V	15.0	1000	1.09	1.19	6040	-0.01	5.2	1
CoRoT-9	G3V	13.7	460	0.99	0.94	5625	-0.01	4.0	1
Kepler-69	G4V	13.7	584	0.81	0.93	5638	-0.29	5.1	2
HD 186408	G1.5V	5.99	21.6	1.25	1.25	5781	0.08	5.8	METI
HD 197076	G5V	6.44	21.0	1.00	0.98	5823	-0.09	5.2	METI
HD 217877	G0V	6.68	30.8	1.05	1.22	5953	-0.10	4.8	?
NGC 6553	G4	8.3	6000				-0.18		

истинный сигнал источника). Для каждой группы с помощью метода Ходжеса–Лемана [39] были найдены усредненные сигналы и из них составлены следующие комбинации: $\text{Sum} = (\text{Sum1} + \text{Sum2})/2$ и $\text{Dif} = (\text{Sum1} - \text{Sum2})/2$.

Если измерения были проведены корректно, а возможный сигнал не зависел от времени, то величина Sum должна быть суммой сигнала и шума, а Dif — чистым шумом. Это предположение проверялось для контроля корректности процедуры измерений и идентификации в ней возможных аномалий.

Для примера оценки Sum и Dif для двух лет накопления (182 записи) источника HD 150433 отдельно для 2015 и 2016 гг. и отдельно для длин волн 2.7 см и 6.3 см показаны на рис. 3. Видно, что функция Dif действительно не имеет отклонений от чисто шумового поведения, но величина Sum показывает признаки двух статистически значимых пиков, которые соответствуют двум известным внеосевым радиоисточникам J164039 – 023942 (350–500 мЯн) и J164116 – 025027 (примерно 50 мЯн) из каталога NVSS [40, 41]. Сигналы сглажены профилем, соответствующим диаграмме направленности антенны. Ожидаемое положение

Таблица 3. Список кандидатов SETI и статистика их наблюдений в 2015–2016 гг.

Звезда	R.A. (J2000), hh:mm:ss	Dec. (J2000), dd:mm:ss	Число дней	Время наблюдений, с	Имя в наблюдениях
HD 1388	00 : 17 : 58.87	-13 : 27 : 20.3	51	658	0017 – 13
HD 1461	00 : 18 : 41.86	-08 : 03 : 10.8	71	902	0018 – 08
HD 13931	02 : 16 : 47.37	+43 : 46 : 22.7	31	530	0216 + 43
HD 38858	05 : 48 : 34.94	-04 : 05 : 40.7	50	635	0548 – 04
CoRoT-5	06 : 45 : 06.54	+00 : 48 : 54.8	103	1308	0645 + 00
HD 50692	06 : 55 : 18.66	+25 : 22 : 32.5	9	124	0655 + 25
HD 51419	06 : 58 : 11.75	+22 : 28 : 33.2	17	231	0658 + 22
HD 69830	08 : 18 : 23.94	-12 : 37 : 55.8	27	348	0818 – 12
HAT-P-43	08 : 35 : 42.17	+10 : 12 : 23.9	27	348	0835 + 10
HD 75732	08 : 52 : 35.81	+28 : 19 : 50.9	34	483	0852 + 28
HD 89307	10 : 18 : 21.28	+12 : 37 : 15.9	82	1058	1018 + 12
HD 95128	10 : 59 : 27.97	+40 : 25 : 48.9	41	664	1059 + 40
HD 99492	11 : 26 : 45.28	+03 : 00 : 22.2	8	102	1126 + 03
HD 114783	13 : 12 : 43.78	-02 : 15 : 54.1	45	572	1312 – 02
HD 134987	15 : 13 : 28.66	-25 : 18 : 33.6	53	726	1513 – 25
HD 146233	16 : 15 : 37.26	-08 : 22 : 09.0	179	2273	1615 – 08
HD 150433	16 : 41 : 08.21	-02 : 51 : 26.2	176	2235	1641 – 02
HD 154088	17 : 04 : 27.84	-28 : 34 : 57.6	118	1664	1704 – 28
HD 157347	17 : 22 : 51.28	-02 : 23 : 17.4	181	2299	1722 – 02
HD 164595	18 : 00 : 38.89	+29 : 34 : 18.9	204	2917	1800 + 29
HD 164922	18 : 02 : 30.86	+26 : 18 : 46.8	35	486	1802 + 26
HD 172051	18 : 38 : 53.40	-21 : 03 : 06.7	93	1237	1838 – 21
CoRoT-25	18 : 42 : 31.11	+06 : 30 : 49.7	126	1613	1842 + 06
CoRoT-9	18 : 43 : 08.81	+06 : 12 : 14.8	146	1854	1843 + 06
Kepler-69	19 : 33 : 02.62	+44 : 52 : 08.0	103	1792	1933 + 44
HD 186408	19 : 41 : 48.95	+50 : 31 : 30.2	97	1862	1941 + 50
HD 197076	20 : 40 : 45.14	+19 : 56 : 07.9	272	3645	2040 + 19
HD 217877	23 : 03 : 57.27	-04 : 47 : 41.4	54	686	2303 – 04
NGC 6553 ^b	18 : 09 : 15.68	-25 : 54 : 27.9	35	483	1809 – 25

^b Шаровое скопление

сигнала кандидата SETI показано стрелкой. Однако, как видно, нет признака сигнала в ожидаемом положении источника HD 150433.

На рис. 4 показаны сигналы для кандидата HD 150433 (1641 – 02), накопленные по всему вре-

мени наблюдения в 2015 и 2016 гг. Снова видно, что статистически значимого сигнала в направлении кандидата SETI нет.

Аналогичный анализ был выполнен для каждого кандидата. Известный уровень шумов позволил

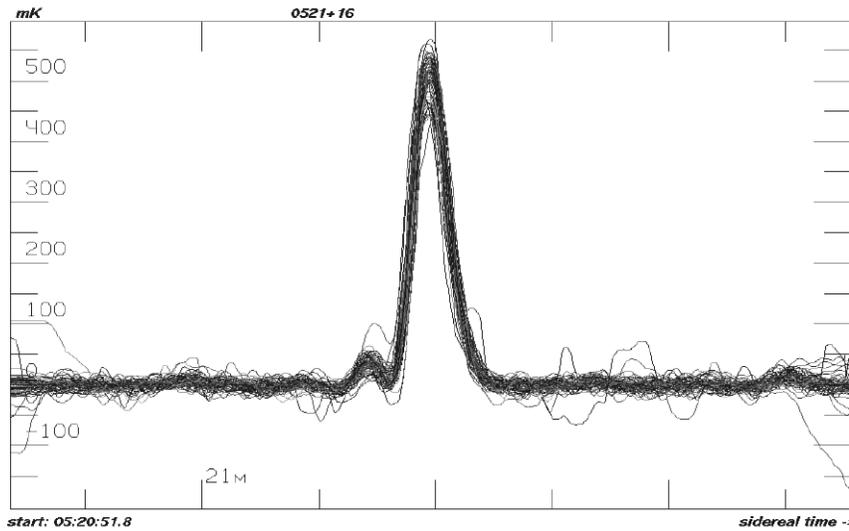


Рис. 2. 65 записей прохождения через диаграмму направленности калибровочного источника 0521+16 (квazar 3C 138 с координатами: R.A.: 05:21:9.89, Dec.: 16:38:22.10 (J2000)). Ширина деления на шкале времени составляет 5 с.

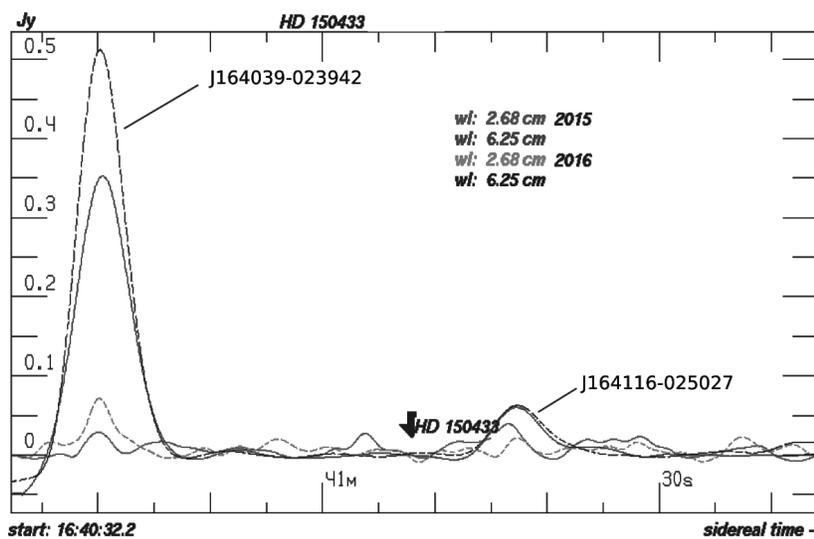


Рис. 3. Результаты накопления сигнала для источника HD 150433 (1641 – 02) в 2015 г. (сплошная линия) и 2016 г. (пунктир) отдельно для длин волн 2.7 см и 6.3 см после свертки с расчетной диаграммой.

оценить для каждого из источников верхнюю границу сигнала. В таблице 4 показаны эти данные для всех объектов ограниченного списка SETI для уровня значимости в три стандартных отклоне-

ния. Там же приведены верхние пределы мощности усредненных за все время наблюдений сигналов и такие же характеристики для среднего единичного наблюдения (вторая строка в таблице 4).

Таблица 4. Верхние пределы для плотности потоков в мЯн/мощности сигнала в Вт, усредненные за весь период наблюдений (вторая строка — средние ограничения для плотности потока/мощности сигнала в отдельных наблюдениях) у кандидатов ограниченного списка SETI

Звезда	2015 г.	2015 г.	2016 г.	2016 г.	Имя в наблюдениях
	2.7 см	6.3 см	2.7 см	6.3 см	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

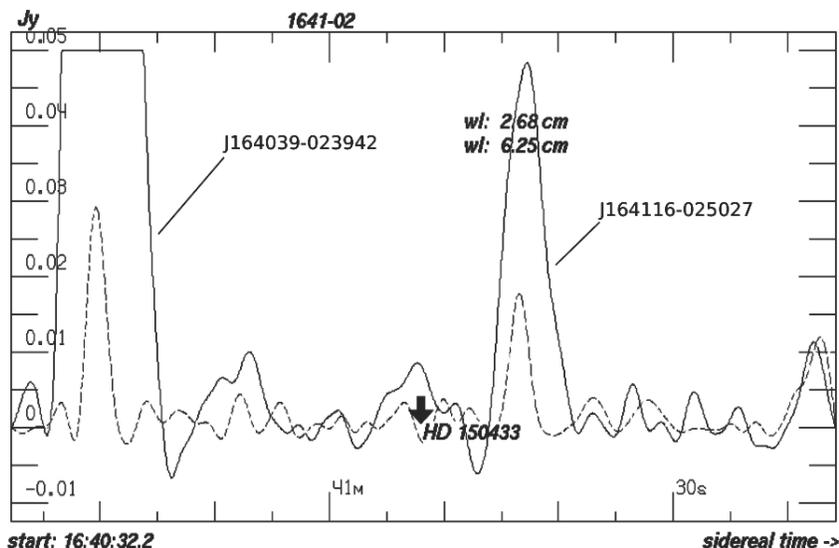


Рис. 4. Накопление сигнала для HD 150433 за два года наблюдений (отдельно для длин волн 2.7 см (пунктир) и 6.3 см) после свертки с расчетной диаграммой.

Таблица 4. (Продолжение)

Звезда	2015 г.	2015 г.	2016 г.	2016 г.	Имя в наблюдениях
	2.7 см	6.3 см	2.7 см	6.3 см	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
HD 1388	3/2.3e+17	7/4.6e+17	2/1.2e+17	2/1.1e+17	0017 – 13
	13/1.1e+18	22/1.4e+18	19/1.5e+18	21/1.4e+18	
HD 1461	28/1.8e+18	2/1.3e+17	35/2.3e+18	3/1.4e+17	0018 – 08
	91/6e+18	19/1e+18	233/1.5e+19	17/8.9e+17	
HD 13931	6/1.6e+18	41/8e+18	10/2.6e+18	23/4.6e+18	0216 + 43
	21/5.2e+18	50/9.9e+18	28/6.9e+18	51/1e+19	
HD 38858	12/3.3e+17	3/7.3e+16	6/1.8e+17	4/9.3e+16	0548 – 04
	34/9.4e+17	21/4.6e+17	51/1.4e+18	19/4.2e+17	
CoRoT-5	2/3.3e+19	3/5.1e+19	2/4.2e+19	3/5.1e+19	0645 + 00
	15/2.9e+20	20/3.1e+20	19/3.6e+20	19/2.9e+20	
HD 50692	5/1.7e+17	8/2.1e+17	4/1.6e+17	4/1.1e+17	0655 + 25
	15/5.4e+17	21/6e+17	17/6.1e+17	8/2.3e+17	
HD 51419	4/2.9e+17	25/1.4e+18	8/5.6e+17	12/6.4e+17	0658 + 22
	14/9.8e+17	28/1.6e+18	19/1.3e+18	17/9.5e+17	
HD 69830	6/1.2e+17	2/2.9e+16	2/4.6e+16	2/3.2e+16	0818 – 12
	13/2.5e+17	17/2.6e+17	16/3e+17	12/1.8e+17	
HAT-P-43	4/1.3e+20	4/1.2e+20	2/5.6e+19	4/1.3e+20	0835 + 10
	11/3.9e+20	16/4.5e+20	14/4.9e+20	15/4.2e+20	
HD 75732	3/5.4e+16	7/1e+17	3/5.1e+16	4/5.2e+16	0852 + 28
	14/2.5e+17	17/2.5e+17	18/3.3e+17	16/2.3e+17	
HD 89307	2/1.8e+17	2/1.6e+17	3/3.2e+17	3/2.6e+17	1018 + 12
	13/1.5e+18	18/1.6e+18	18/2.1e+18	19/1.7e+18	

Таблица 4. (Продолжение)

Звезда	2015 г.	2015 г.	2016 г.	2016 г.	Имя в наблюдениях
	2.7 см	6.3 см	2.7 см	6.3 см	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
HD 95128	4/9.9e+16	8/1.5e+17	7/1.6e+17	10/1.8e+17	1059 + 40
	15/3.5e+17	23/4.3e+17	28/6.5e+17	36/6.7e+17	
HD 99492	3/1e+17	7/2.2e+17	5/1.8e+17	4/1.2e+17	1126 + 03
	10/3.9e+17	15/4.7e+17	13/5e+17	6/1.9e+17	
HD 114783	7/3.6e+17	3/1.2e+17	3/1.7e+17	4/1.4e+17	1312 – 02
	16/8e+17	15/6e+17	20/1e+18	24/9.6e+17	
HD 134987	5/2.8e+17	5/2.4e+17	4/2.2e+17	7/3.4e+17	1513 – 25
	18/1.1e+18	20/9.4e+17	24/1.4e+18	32/1.5e+18	
HD 146233	8/2e+17	3/5.3e+16	6/1.4e+17	2/4.5e+16	1615 – 08
	67/1.6e+18	18/3.4e+17	130/3e+18	22/4.1e+17	
HD 150433	3/3e+17	3/2.3e+17	2/2.4e+17	5/4.4e+17	1641 – 02
	19/2e+18	19/1.6e+18	25/2.6e+18	23/1.9e+18	
HD 154088	4/1.5e+17	2/5e+16	4/1.6e+17	3/1e+17	1704 – 28
	22/8.6e+17	22/6.9e+17	22/8.6e+17	27/8.5e+17	
HD 157347	4/1.6e+17	2/6.2e+16	2/8.6e+16	1/4.7e+16	1722 – 02
	20/9.1e+17	16/5.8e+17	24/1.1e+18	23/8.4e+17	
HD 164595	1/1.3e+17	4/3.6e+17	2/1.5e+17	1/8e+16	1800 + 29
	17/1.7e+18	25/2e+18	22/2.2e+18	23/1.8e+18	
HD 164922	3/1.8e+17	11/5e+17	3/1.8e+17	16/7.6e+17	1802 + 26
	20/1.2e+18	26/1.2e+18	19/1.1e+18	34/1.6e+18	
HD 172051	2/4.2e+16	2/2.6e+16	1/2.6e+16	6/1e+17	1842 + 06
	16/3.2e+17	18/2.9e+17	21/4.2e+17	25/4e+17	
CoRoT-25	3/4.1e+20	4/3.9e+20	1/1.7e+20	2/2e+20	1843 + 06
	14/1.7e+21	18/1.7e+21	17/2e+21	20/1.9e+21	
CoRoT-9	1/3.3e+19	1/2.8e+19	2/5.6e+19	2/3.8e+19	1933 + 44
	15/3.8e+20	18/3.6e+20	18/4.6e+20	19/3.8e+20	
Kepler-69	5/4.1e+20	7/4.5e+20	4/3.7e+20	6/3.9e+20	1941 + 50
	25/2.1e+21	32/2.1e+21	31/2.6e+21	47/3.1e+21	
HD 186408	30/1.7e+18	212/9.5e+18	42/2.3e+18	130/5.8e+18	2040 + 19
	43/2.4e+18	215/9.6e+18	56/3.1e+18	143/6.4e+18	
HD 197076	1/7.4e+16	2/7.6e+16	1/5.8e+16	1/5.1e+16	2303 – 04
	15/7.9e+17	19/8e+17	19/1e+18	21/8.9e+17	
HD 217877	5/5.2e+17	5/4.4e+17	11/1.3e+18	3/2.8e+17	1809 – 25
	30/3.4e+18	17/1.5e+18	70/7.9e+18	21/1.9e+18	
NGC 6553	9/3.9e+22	5/1.8e+22	3/1.2e+22	10/3.3e+22	1838 – 21
	25/1.1e+23	20/6.9e+22	22/9.5e+22	39/1.3e+23	

Другим методом поиска широкополосного сигнала кандидатов SETI был поиск корреляций сигналов на длинах волн 2.7 см и 6.3 см. Для полу-

чения коэффициентов корреляции наборы данных разных длин волн каждого кандидата были согласованы по времени наблюдения. Различия между

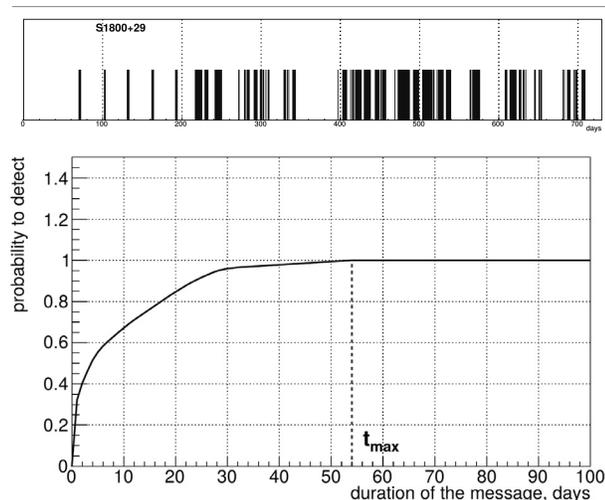


Рис. 5. Верхняя панель: последовательность наблюдений для кандидата 1800+29 (HD 164595). Нижняя панель: вероятность детектирования сообщения в зависимости от его длительности для того же источника. Пунктиром на графике обозначена максимальная длительность сигнала t_{\max} , после которой вероятность регистрации становится равна 100%.

количеством дней наблюдения для разных длин волн обусловлены в основном слишком большими внешними шумами, которые возникали независимо в разных диапазонах частот и иногда из-за неработоспособности радиометра какой-нибудь длины волны.

Для всех кандидатов ограниченного списка были рассчитаны коэффициенты линейной корреляции между данными для волн 2.7 см и 6.3 см. Для контроля за случайностью корреляций была проведена также аналогичная обработка данных со сдвигом временных серий на один, два и три дня. Среднее значение корреляции во всех случаях составило $r_{\text{avg}} = 0.06 \pm 0.12$. Это говорит о том, что неслучайные корреляции между сигналами на разных длинах волн отсутствуют. Это особенно очевидно для кандидатов с большим количеством наблюдений. Таким образом, корреляционный анализ тоже показывает отсутствие реальных сигналов для кандидатов SETI из ограниченного списка.

Как уже отмечалось во Введении, используя серии повторяющихся наблюдений, для каждого кандидат SETI можно получить ограничения на максимальную длительность одиночных сообщений. На рис. 5 (верхняя панель) приводится последовательность наблюдений в рамках программы одного из кандидатов в течение двух лет. Легко увидеть, что сигнал с мощностью на уровне верхнего предела из таблицы 4 детектировался бы с вероятностью 100% при длительности передачи, превышающей 54 дня.

Для более коротких сообщений можно найти вероятность их детектирования. На рис. 5 (нижняя

панель) показана зависимость вероятности обнаружения сообщения от его длительности. Видно, например, что сообщение с длительностью около четырех дней было бы детектировано с вероятностью 5%.

Нетрудно понять, что оптимальной последовательностью наблюдений для того, чтобы обеспечить как можно более короткую продолжительность сообщения, которое будет детектировано с вероятностью 100%, должна быть эквидистантная последовательность во времени. Последовательность на рис. 5 в целом не является оптимальной с этой точки зрения. Однако можно видеть, что в течение сессии наблюдений 2015–2016 гг. встречались относительно продолжительные периоды, когда наблюдения проводились ежедневно, и продолжительность самого короткого сообщения, которое детектируется с вероятностью 100%, была всего одни сутки.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В наблюдениях 2015 и 2016 гг. на телескопе РАТАН-600 признаки регистрации внеземных сигналов искусственного происхождения отсутствовали.

Накопление информации за два года наблюдений позволило провести в сантиметровом диапазоне поиск слабых сигналов с уровнем обнаружения в несколько миллионных. Усредненные по всему набору данных ограничения для мощности сигналов ВЦ лежат практически у всех объектов в интервале 10^{16} – 10^{20} Вт, верхние же пределы для светимости в единичных наблюдениях (время прохождения диаграммы 7–19 секунд) составляют 10^{17} – 10^{21} Вт. Поскольку антенное усиление для параболических излучателей большого размера в сантиметровом диапазоне (Аресибо) достигает 5×10^7 , эффективные изотропные излучаемые мощности (EIRP) [8, 17] гипотетических передатчиков ВЦ могут не превышать 2×10^9 – 2×10^{13} Вт, что близко к этому параметру у крупнейших наземных планетарных радаров. Анализ статистики сеансов наблюдений в течение двух лет показал, что при ежедневных сетах передачи с мощностью, превышающей приведенные ограничения, длительностью в сутки могут обнаруживаться с вероятностью 100%. Наконец, ни в отдельных наблюдениях, ни в среднем за весь период мониторинга и радиоизлучение солнцеподобных звезд-хозяек экзопланет, превышающее по мощности значения из таблицы 4, не было обнаружено. Наблюдения по программе SETI на телескопе РАТАН-600 продолжают.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН в части «Проведение фундаментальных научных исследований». Наблюдения экзопланет на радиотелескопе RATAN-600 были поддержаны грантом РФФ № 14-50-00043 (направление «Экзопланеты»). Анализ данных проводился при поддержке гранта РФФИ № 17-52-45048, а также Федеральной программы повышения конкурентоспособности Казанского (Приволжского) федерального университета.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- G. Cocconi and P. Morrison, *Nature* **184**, 844 (1959).
- F. D. Drake, *Physics Today* **14**, 40 (1961).
- V. S. Troitskii, *Scientific basis of the existence of and search for extraterrestrial civilizations* (Nauka, Moscow, 1986).
- J. C. Tarter, A. Agrawal, R. Ackermann, *SPIE Conf. Proc.* **7819**, 781902 (2010).
- J. T. Wright, S. Kanodia, and E. Lubar, *Astron. J.* **156**, 260 (2018).
- H. Isaacson, A. P. V. Siemion, G. W. Marcy, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **129**, 054501 (2017).
- S. P. Worden, J. Drew, A. Siemion, et al., *Acta Astronautica* **139**, 98 (2017).
- J. E. Enriquez, A. Siemion, G. Foster, et al., *Astrophys. J.* **849**, 104 (2017).
- V. S. Troitskij, L. N. Bondar', and A. M. Starodubtsev, *Uspekhi Fiz. Nauk* **113**, 719 (1974).
- N. S. Kardashev, V. A. Soglasnov, N. A. Savel'eva, et al., *Astron. Zh.* **54**, 3 (1977).
- Л. М. Гиндилис, *SETI: Поиск внеземного Разума* (Физматлит, Москва, 2004).
- M. Mayor and D. Queloz, *Nature* **378**, 355 (1995).
- W. J. Borucki, D. Koch, G. Basri, et al., *Science* **327**, 977 (2010).
- S. R. Kane, M. L. Hill, J. F. Kasting, et al., *Astrophys. J.* **830**, 1 (2016).
- A. P. V. Siemion, P. Demorest, E. Korpela, et al., *Astrophys. J.* **767**, 94 (2013).
- S. K. Sirothia, A. Lecavelier des Etangs, Gopal-Krishna, et al., *Astron. and Astrophys.* **562**, A108 (2014).
- G. R. Harp, J. Richards, J. C. Tarter, et al., *Astron. J.* **152**, 181 (2016).
- J.-L. Margot, A. H. Greenberg, P. Pinchuk, et al., *Astron. J.* **155**, 209 (2018).
- B. M. Oliver and J. Billingham, eds., *Project Cyclops: A Design Study of a System for Detecting Extraterrestrial Intelligent Life* (Stanford Research Institute; United States. National Aeronautics and Space Administration. Project Cyclops; Ames Research Center. Project Cyclops, 1971).
- A. Wandel, *Int. J. Astrobiology* **14**, 511 (2015).
- E. M. Gabidulin and N. I. Pilipchuk, *Lekcii po teorii informacii* (MFTI, Dolgoprudnyj, 2007) [in Russian].
- В. В. Котельников, в: *Внеземные цивилизации*, 83 (Ереван, 1965).
- J. M. Cordes, J. W. Lazio, and C. Sagan, *Astrophys. J.* **487**, 782 (1997).
- H. Maehara, T. Shibayama, S. Notsu, et al., *Nature* **485**, 478 (2012).
- M. Lingam and A. Loeb, *Astrophys. J.* **848**, 41 (2017).
- N. S. Kardashev, *Sov. Astron.* **8**, 217 (1964).
- А. Б. Берлин, Н. А. Нижельский, П. Г. Цыбулев, и др., *Труды ИПА РАН* **24**, 183 (2012).
- O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., *Preprint № 87, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs. RAS, 1992)*
- L. N. Filippova and V. S. Strel'nitskij, *Astronomicheskij Tsirkulyar* **1531**, 31 (1988).
- ARI Data Base for Nearby Stars. ARICNS stars in the Henry Draper ue (HD) or in the HD Extension (HDE), <http://wwwadd.zah.uni-heidelberg.de/datenbanken/aricns/hd.htm> (accessed 04.09.17).
- SIMBAD Astronomical Database, <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/> (accessed 04.09.17).
- The VizieR Service for Astronomical Catalogues (CDS, Strasbourg, France), <http://vizier.u-strasbg.fr/> (accessed 04.09.17).
- NASA exoplanet archive, <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html> (accessed 04.09.17).
- The Exoplanet Data Explorer, <http://exoplanets.org/table> (accessed 04.09.17).
- Exoplanet.eu, <http://exoplanet.eu/catalog/> (accessed 04.09.17).
- Planetary systems, <http://www.allplanets.ru/index.htm> (accessed 04.09.17) [in Russian].
- G. Takeda, E. B. Ford, A. Sills et al., *Structure and Evolution of Nearby Stars with Planets II*, <http://exoplanets.astro.yale.edu/science/analysis/spocs-evol.php> (accessed 04.09.17).
- W. E. Harris, *Catalog of parameters for Milky Way globular clusters: the database*, <http://physwww.physics.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat> (accessed 04.09.17).
- M. Kendall, and A. Stuart, *Inference and Relationship*, Vol.2: *The advanced theory of statistics* (Griffin, London, 1961; Nauka, Moscow, 1973).
- J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astron. J.* **115**, 1693 (1998).
- J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *The NRAO VLA Sky Survey*, <http://www.cv.nrao.edu/nvss> (accessed 04.09.17).

The SETI-observations with the RATAN-600 Telescope in 2015 and 2016 Sessions

A. D. Panov, N. N. Bursov, G. M. Beskin, A. K. Erkenov, L. N. Filippova, V. V. Filippov, L. M. Gindilis, N. S. Kardashev, A. A. Kudryashova, E. S. Starikov, J. Vilson, and L. A. Pustil'nik

Regular observations according to the SETI program have been carrying out at the Russian radio telescope RATAN-600 since 2015. The objects of observations are about 30 sun-like stars and two globular clusters with high metallicity. The basic idea inherent the program is repeated multi-frequency observations of the same objects. Data of observations were processed by three methods: searching strong single signal, accumulation of signal from every SETI-candidate and searching correlation of signals on different waves. Collection data of 2 years allows finding faint steady signal with flux up to a few mJy. The main results of the observations in 2015-2016 are presented in the report. The found limits of the radio emission for the objects of the used list of the SETI-candidates are given in the end of the article.

Keywords: *SETI*