

Анализ работы планетных радаров применительно к SETI и METI

Д. А. Чураков

Получена 5 марта 2009 г.

Планетная радиолокация в течение последних 50-ти лет является важной частью технологической деятельности человечества. Излучение планетных радаров носит направленный характер, его легко обнаружить на межзвездных расстояниях и поэтому определение характеристик подобного технологического излучения представляет интерес как для построения стратегий поиска внеземных цивилизаций с помощью средств радиоастрономии (SETI), так и для программ отправки радиосообщений к другим звездам (METI или “Active SETI”).

Ключевые слова: планетарная радиолокация, поиск внеземных цивилизаций, межзвездная связь.

Человечество достаточно давно является источником радиоизлучения в Солнечной системе и за ее пределами. Первые шировещательные радиостанции начали работу 100 лет назад, позже к ним присоединилось телевидение, спутниковая, мобильная связь и радары всевозможного назначения. Радиоизлучение стало неотъемлемым проявлением нашей деятельности и самого нашего существования, причем проявлением космического масштаба. Радиоволны, покинувшие Землю десятки лет назад, к настоящему моменту преодолели такое же количество световых лет и оставили позади немало ближайших звезд. Но означает ли это, что границы нашего присутствия во Вселенной достигли межзвездных расстояний? Скорее нет, чем да.

Подавляющее большинство земных радиоисточников излучают всенаправленно и поэтому их сигналы трудно зарегистрировать на больших расстояниях. Для приемной антенны с эффективной площадью S_r , находящейся на расстоянии R от источника радиоизлучения, отношение сигнал/шум (SNR) определяется формулой

$$SNR = \frac{S_r EIRP}{4\pi R^2 k T_{шум} \Delta f} \quad (1)$$

где k - постоянная Больцмана, $T_{шум}$ – суммарная шумовая температура приемной системы, Δf – ширина полосы излучения, $EIRP$ – эквивалентно-изотропная излучаемая мощность радиоисточника (ЭИИМ). Исходя из этой формулы, можно оценить предельную дальность обнаружения различных типов технологического радиоизлучения Земли некоторыми современными и перспективными системами. Результаты таких оценок для 70-м антенн сети дальней космической связи (DSN), радиотелескопа Аресибо и разрабатываемой системы Square Kilometre Array (SKA) приведены в таблице 1.

Таблица 1.

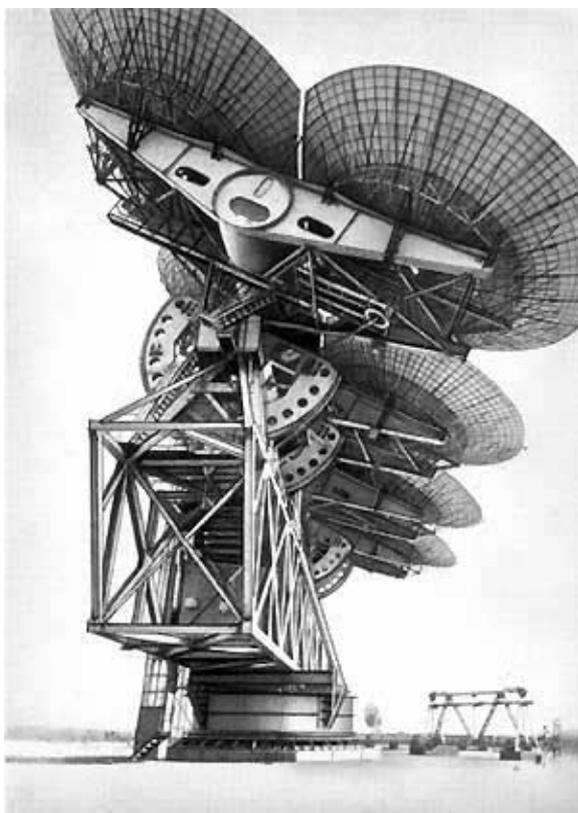
Источник излучения	Частота, МГц	Ширина полосы	$T_{шум}$, К	ЭИИМ	Дальность обнаружения при SNR=10		
					DSN	Аресибо	SKA
FM-радиостанция	90	100 кГц	430	5 МВт	2.4 а.е.	7.6 а.е.	44 а.е.
ТВ-станция (телесигнал)	500	6 МГц	50	5 МВт	1.1 а.е.	3.5 а.е.	20 а.е.
ТВ-станция (несущая)	500	0.1 Гц	50	5 МВт	0.13 ly	0.4 ly	2.3 ly
Метеорадар	2800	1 МГц	40	30 ГВт	0.005 ly	0.015 ly	0.09 ly
Планетный радар	2380	0.1 Гц	40	1 ТВт	70 ly	210 ly	1200 ly

(Аресибо)							
-----------	--	--	--	--	--	--	--

Как видно, область устойчивого приема земных передач простирается не далее ближайших окрестностей Солнечной системы, а на больших межзвездных расстояниях единственно обнаружимым остается только излучение планетных радаров. Данный факт существенен с точки зрения программ поиска внеземного разума (SETI), поскольку наиболее заметным проявлением других цивилизаций в радиодиапазоне также может оказаться излучение планетных радаров и поэтому определение общих характеристик подобного технологического излучения приобретает большое значение.

Планетные радары: характеристики и статистика.

История планетных радаров в современном их понимании начинается в конце 50-х годов 20-го века, когда были предприняты попытки получить отраженный сигнал от ближайших планет. Первые сеансы радиолокации Венеры состоялись в 1958-1959 годах в Миллстоун Хилл и Джодрелл Бэнк. Все эти попытки были неудачны, но именно они положили начало эре планетных радаров, которая таким образом насчитывает уже 50 лет.



Более масштабное и систематическое зондирование планет Солнечной системы началось в 1960-х годах, когда для обеспечения экспедиций межпланетных зондов были введены в строй станции дальней космической связи. Из них в качестве планетных радаров в США использовалась станция DSS-13 “Venus” с 32-метровой антенной в Голдстоуне, а в СССР – евпаторийский комплекс АДУ-1000, с оригинальной системой из 8-ми 16 метровых антенн (рис.1). Позднее в США и СССР были созданы антенны диаметром 64-70 метров, которые после нескольких модернизаций используются и в настоящее время. Важный вклад в радарные исследования также внесла ионосферная обсерватория Аресибо с уникальной неподвижной антенной диаметром 300 м. Ее описание, как и историю развития планетной радиолокации в целом можно найти в ретроспективе [1], а также в [2]-[4], а здесь же ограничимся кратким перечислением некоторых технических характеристик наиболее используемых планетных радаров.

Рис.1. Антенный комплекс АДУ-1000 в Евпатории

Таблица 2.

Радар	Годы работы	Размер антенны, м	Мощность передатчика, кВт	Рабочие частоты, МГц	Размер луча, угл.сек
Евпатория					
АДУ-1000	1961-1985	32x64	64–100	769	2500x1250
РТ-70	>1978	70	200	5010	180
Аресибо					
АЮ	1964-1974	305	200	430	470
	>1974	305	900	2380	85
Голдстоун					

DSS-13	1962-1966	32	150	2388	810
DSS-14	>1966	64 (70)	400	2388 и 8510	370 и 100

Интенсивность работы планетных радаров в разные годы определялась как научными задачами, так и сугубо экономическими и политическими причинами. В целом прослеживается несколько максимумов, последний из которых приходится на 1990-2000 годы, когда применение больших ПЗС-матриц в обзорных исследованиях неба привело к массовым открытиям небольших околоземных астероидов и соответственно к радарным исследованиям этих астероидов. Всего в доступных источниках [5-7] содержатся данные по ~1400 сеансам радиолокации объектов Солнечной системы, что, видимо, составляет не менее половины от их общего количества за все 50 лет.

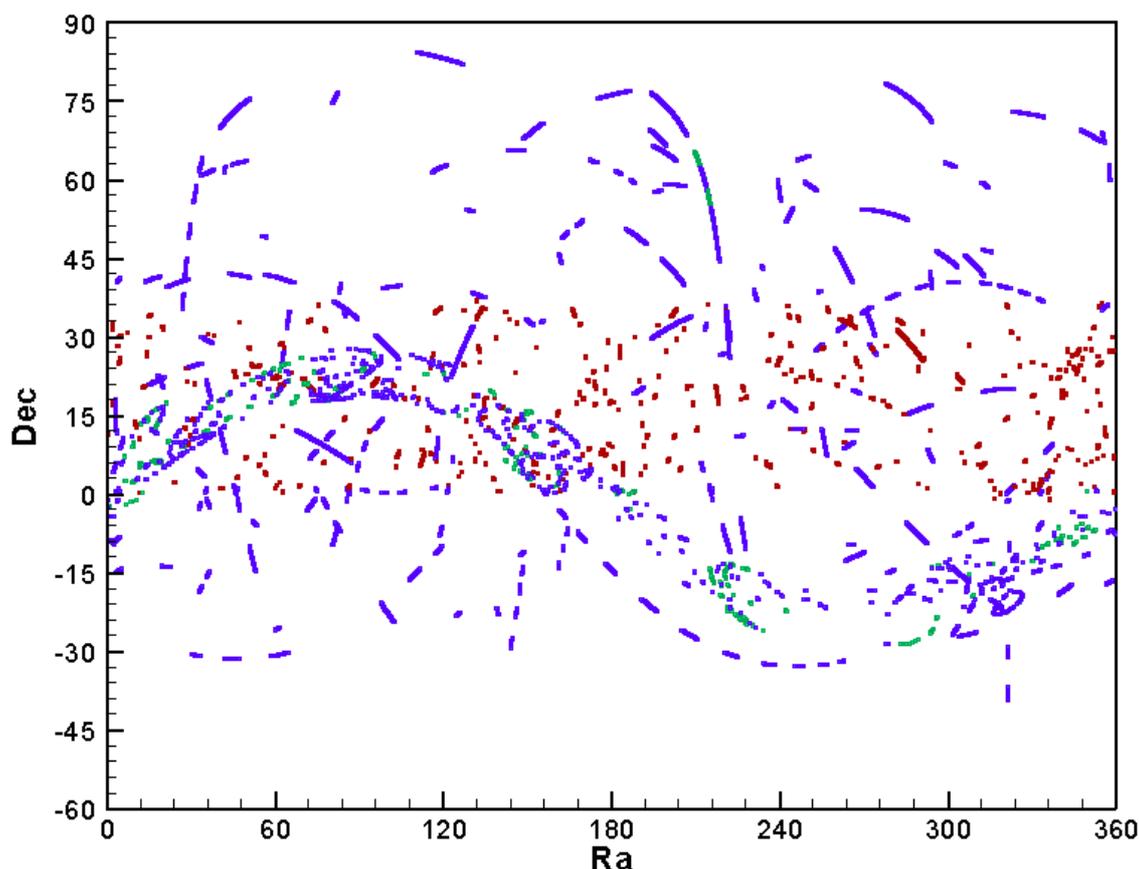


Рис.2. Покрытие неба засветкой планетных радаров. Синие точки – сеансы работы радара Голдстоуна, красные – Аресибо, зеленые – Евпатории.

Распределение всех сеансов радиолокации на небесной сфере представлено на рис.2. Распределение существенно неоднородно: по географическим причинам не охвачена южная часть неба, а 65% всех сеансов радиолокации приходится на область в пределах 10° от плоскости эклиптики.

Планетные радары с точки зрения SETI.

Суммарная статистика по всем 1400 сеансам радиолокации позволяет смоделировать важные характеристики направленного технологического излучения цивилизации типа земной. Общая площадь участков, попавших в лучи планетных радаров за 50 лет, равна $S=2.2 \cdot 10^{-2}$ ср или примерно 0.2% всей небесной сферы.

Сколь ни мала эта величина, существует определенная вероятность того, что в лучи радаров попадет какая-нибудь звезда. Возможна и обратная ситуация – наша Земля окажется в луче радара иной цивилизации. При аналогичной интенсивности использования радаров и изотропном распределении радарной “засветки” по небесной сфере можно оценить

вероятность такого события, она составляет $p_1 \sim 4 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$. Величина исключительно небольшая, но огромное количество звезд в галактике позволяет смотреть на проблему с оптимизмом и поиски таких технологических сигналов ведутся.

В настоящее время наиболее перспективными в данном направлении выглядят исследования с помощью антенной решетки Аллена (Allen Telescope Array, АТА) [8]. Сейчас АТА состоит из 42 антенн диаметром 6 метров каждая, он может просматривать участок неба площадью 2.5 кв. градуса, либо перестраивать антенную диаграмму и наблюдать одновременно несколько небольших участков с большей чувствительностью. Важной особенностью АТА является возможность регистрации узкополосных сигналов в диапазоне частот от 0.5 до 11 ГГц, что делает его наиболее подходящим инструментом для поиска и обнаружения радиоизлучения других цивилизаций.

В рамках SETI на АТА планируются наблюдения 2-х типов: целенаправленный поиск радиоизлучения от нескольких перспективных звезд и обзоры больших участков неба в районе галактической плоскости и балджа галактики. Второй вариант наиболее интересен в плане поиска “радарного” излучения. В этом случае в поле зрения синтезированных лучей АТА в течение длительного времени будет находиться большое число звезд (до $10^5 \dots 10^6$ согласно [9]), а, значит, шансы на обнаружение искусственных сигналов могут быть достаточно велики. Используя вышеприведенную вероятность p_1 , можно оценить потенциальное число “интересных” событий как

$$N_{\text{соб}} = N_{\text{цив}} \cdot p_1 \cdot t, \quad (2)$$

где $N_{\text{цив}}$ – общее число радиоизлучающих цивилизаций, оказавшихся в синтезированных лучах АТА, t – суммарное время наблюдения. Пусть возле каждой звезды имеется по одной цивилизации, тогда для $t=5$ лет и числа звезд в луче $N=10^6$ получаем $N_{\text{соб}} \sim 10^2$. Эта величина является максимальной оценкой сверху, фактическое число событий будет гораздо меньшим, если не тождественно нулевым. Но даже и в этом случае наблюдения АТА дадут первую количественную оценку распространенности цивилизаций земного типа в нашей галактике.

Планетные радары с точки зрения METI.

Концепция отправки сообщений к соседним звездам с целью установления контакта, известная также как METI (Messaging to Extraterrestrial Intelligence) [10-11], получила в последнее время достаточно большое развитие и признание – более десятка посланий ушло в космос, из них некоторые направлены к звездам с известными планетными системами. Сеансы работы планетных радаров также могут рассматриваться, как своеобразные призывы установить контакт. Пускай они и не несут никакой полезной информации, несомненная искусственность сигнала может вызвать интерес к нашему Солнцу у иных цивилизаций, если таковые окажутся в луче радара.

Основным минусом данного подхода является нецеленаправленность передач. Во время работы радара луч наводится на объект зондирования, а будут ли на его пути звезды, тем более близкие – дело случая. Впрочем, общее число “засвеченных” звезд может быть довольно значительным. Исходя из средней концентрации звезд в окрестностях Солнца $\sim 0.2 \text{ пк}^{-3}$ и общей площади “засветки” $\sim 0.2\%$ всей небесной сферы можно оценить, что за 50 лет в лучи радаров попало до 1000 звезд, удаленных на расстояние до 100 пк.

Более подробное исследование на эту тему было проведено с помощью службы высокоточных эфемерид HORIZONS [12]. Для каждого из 1400 сеансов с помощью HORIZONS определялась траектория движения по небу объекта локации (планеты, астероида или кометы) и далее по заданному каталогу звезд проверялось, не попала ли какая из них в луч радара. В качестве базового использовался каталог HIPPARCOS [13], содержащий информацию по параллаксам и собственным движениям 120000 звезд. В качестве вспомогательных использовались еще 2 каталога: НАВСАТ, состоящий из 17000 потенциально обитаемых звезд, отобранных для исследования в рамках текущих и будущих проектов SETI (подробности в [14]) и список из 262 звезд с известными планетными системами.

Всего было выявлено несколько сотен событий, когда звезда попадала в луч радара, часть из них приведена в приложении 1. В списке значатся несколько потенциально “обитаемых” звезд, но ни одной звезды с известными (на 2008 год) экзопланетами. Продолжительность событий меняется в широких пределах и зависит от угловой скорости объекта локации в момент зондирования. Для удаленных объектов, таких как планеты и астероиды основного пояса, она может достигать десятков минут и часов, для околоземных астероидов (NEA, Near-Earth Asteroid), наблюдаемых во время сближения на расстояниях до 0.1 а.е., продолжительность события обычно не превышает 2-3 минут. Фактическое же время излучения сигнала в сторону звезды определяется режимом работы радара. В моностатической схеме, когда одна и та же антенна используется и для передачи и для приема сигнала, периоды излучения чередуются с периодами приема радиоэха. Длительность каждого периода определяется временем прохождения сигнала до объекта и обратно, и, например, для Венеры возле нижнего соединения составляет около 5 минут. В зависимости от режима работы радара и других обстоятельств к звезде может уйти один продолжительный сигнал, серия коротких или никакого сигнала вообще. К сожалению подробности работы радаров в источниках указываются далеко не всегда, каждый конкретный случай надо тщательно перепроверять по первоисточникам и для простоты здесь и всюду далее приводится максимально возможное время нахождения в луче.

Закономерен вопрос о принципиальной возможности обнаружения иной цивилизацией нашего технологического сигнала. Размер приемной антенны, необходимой для регистрации излучения планетного радара, можно определить из модифицированной формулы (1)

$$S_2 = \frac{SNR \cdot k T_{шум} R^2 \lambda^2}{P S_1 t \sqrt{n}} \quad (3)$$

где SNR – отношение мощностей сигнала и флуктуации шума, R - расстояние до звезды, λ - длина волны, P - средняя мощность излучения, S_1 и S_2 - эффективные площади передающей и приемной антенн, k - постоянная Больцмана, $T_{шум}$ - шумовая температура приемной системы, t – время когерентного накопления сигнала, T - время некогерентного накопления сигнала, $n=T/t$ - количество независимых оценок некогерентного накопления.

По этой формуле был вычислен необходимый размер приемной антенны для каждого обнаруженного события. Шумовая температура принималась равной $T_{шум}=100$ К, $SNR=10$, $t=1$ с, а T приравнялось к продолжительности нахождения звезды в луче. Результаты приведены в последней колонке таблицы приложения 1. Как видно, для обнаружения сигнала во многих случаях достаточно антенны аналогичной по размерам радиотелескопу Аресибо. Таким образом, регистрация возможна, хотя вероятность того, что антенны другой цивилизации будут в нужный момент слушать именно Солнце и именно возле нужной частоты, следует признать весьма малой.

Другой интересный вопрос связан с временем получения возможного ответа, если сигнал нашего радара все-таки будет обнаружен и на него последует какая-то реакция. Как показывает анализ, в лучи радаров попадали по большей части далекие звезды, находящиеся на расстояниях во многие сотни световых лет, и поэтому основную массу ответных сигналов следует ожидать не ранее 24-25 веков н.э. Тем не менее имеется случай, когда сигнал ушел к близкой звезде.

13 мая 1977 года во время зондирования Венеры с помощью планетного радара АДУ-1000 в Евпатории в луче оказалось сразу 2 близкие звезды. Звезда HIP 3829 прошла по самому краю луча и в боковых лепестках антенной диаграммы и интересна прежде всего небольшим удалением от Солнца. HIP 3829 – звезда ван Маанена, ближайший белый карлик, находится на расстоянии всего в 14.4 световых лет. Это могло бы представлять интерес с точки зрения МЕТИ (дата получения возможного ответа – 2006 г.), если бы не тот факт, что белые карлики, в особенности такие холодные и старые, как звезда ван Маанена (ее возраст

оценивается в 10 млрд. лет), едва ли могут рассматриваться как подходящее место для поиска разумной жизни.

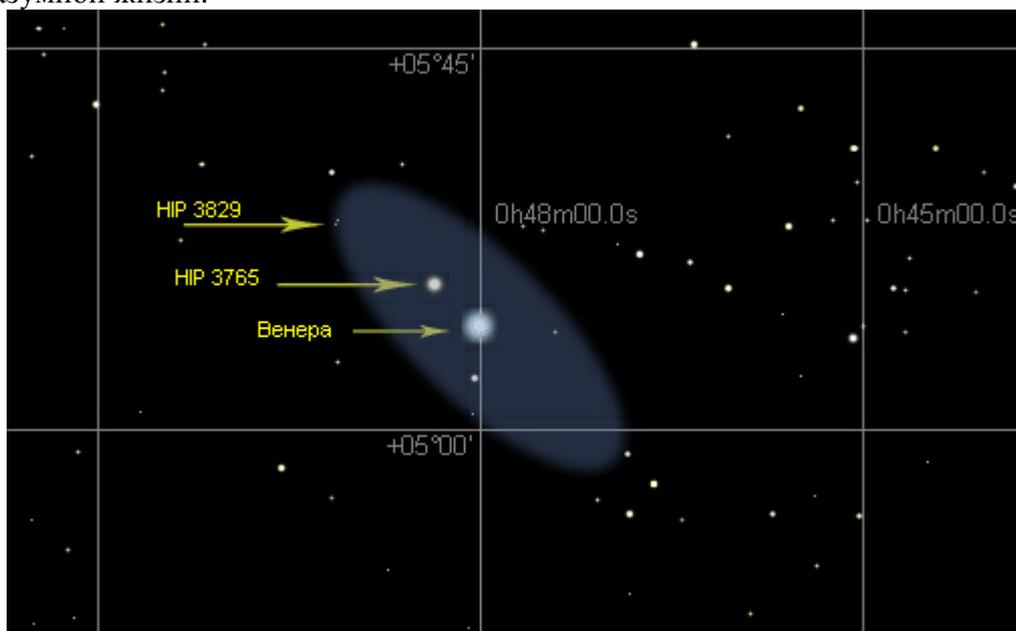


Рис.3 Схема события 13 мая 1977 года. Полупрозрачной заливкой показан луч радара АДУ-1000, стрелками – звезды HIP 3765, HIP 3829 и Венера.

Другая близкая звезда, оказавшаяся в тот момент в луче, носит обозначение HIP 3765 (или же HD 4628, GJ 33) и удалена от нас на расстояние 24.3 световых года. Это оранжевый карлик с массой $0.8 \cdot M_{\text{sun}}$, светимостью $0.24 \cdot L_{\text{sun}}$ и небольшой металличностью. HIP 3765 включена в НАВСАТ, как потенциально обитаемая, хотя планет у нее пока не обнаружено. Ввиду малого удаления звезды и большой продолжительности пребывания ее в луче радара требования к антенне, необходимой для регистрации нашего сигнала, достаточно умеренны. Сигнал можно в принципе обнаружить с помощью аналога радиотелескопа Аресибо, но были ли он в действительности кем-либо услышан, мы узнаем не ранее 2026 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Butrica A. To see the unseen: A history of planetary astronomy, 1996, NASA History Series
2. Радиосистемы межпланетных космических аппаратов. Под ред. А. С. Винницкого, «Радио и Связь», М., 1993.
3. Deep Space Network Homepage , <http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsn>
4. Arecibo Observatory Homepage , <http://www.naic.edu>
5. Данные по радиолокации планет радаром Голдстоуна с Planetary Ephemeris Data , <http://iau-comm4.jpl.nasa.gov/plan-eph-data/index.html#radar>
6. Данные по радиолокации планет радаром Евпатории с Russian Radar Ranging of Planets (1962-1995) , <http://www.ipa.nw.ru/PAGE/DEPFUND/LEA/ENG/rrr.html>
7. Данные по радиолокации астероидов радаром Аресибо и Голдстоун с Radar Astrometry Data , <http://ssd.jpl.nasa.gov/?radar>
8. Allen Telescope Array Homepage , <http://www.seti.org/Page.aspx?pid=503>
9. David R. DeBoer The Allen Telescope Array: commensal and efficient SETI, 2004, IAC-04-IAA.1.1.1.03
10. Зайцев А.Л. Радиовещание для внеземных цивилизаций. Информационный бюллетень SETI, № 15, 1999, с. 31-47. См. также: <http://www.cplire.ru/rus/ra&sr/article1.html>
11. Zaitsev A. Sending and Searching for Interstellar Messages. Acta Astronautica, vol. 63 (2008), pp. 614–617. См. также: <http://arxiv.org/abs/0711.2368v1>
12. HORIZONS System , <http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>
13. Hipparcos Input Catalogue, Version 2, I196 , <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?I/196>

14. M. Turnbull and J. Tarter. Target Selection for SETI: 1. A Catalog of Nearby Habitable Stellar Systems, [arXiv:astro-ph/0210675v1](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0210675v1)

Приложение 1.

Потенциальные “МЕТИ-события”, имевшие место при радиолокации планет и малых тел Солнечной системы в 1962-2007 годах.

В таблице приведены некоторые случаи попадания звезд в лучи планетных радаров. Для каждого события указаны следующие данные:

1. Объект радиолокации, дата сеанса, максимально возможная продолжительность нахождения звезды в луче T_{\max} в минутах
2. Наименование радара (“А” – Аресибо, “Е” – Евпатория, “G” – Голдстоун, “Н” – Хейстек) и его рабочая частота в этом сеансе.
3. Обозначение звезды, попавшей в луч, по каталогу HIPPARCOS, расстояние до нее в световых годах и является ли она потенциально обитаемой по критериям каталога НАВСАТ.
4. Класс антенны, необходимой для регистрации сигнала, достигшего этой звезды, и год прибытия возможного ответа (не ранее чем). “ADU” – небольшая антенна типа евпаторийской АДУ-1000, “DSN” – аналог антенн сети дальней космической связи, “AR” – аналог радиотелескопа Аресибо, “SKA” – антенная система, сопоставимая с Square Kilometre Array.

Объект локации	Событие		Радар		Звезда			Ответ	Антенна
	Дата	T_{\max} , мин	ID	f , МГц	HIP	L, св.год	Тип		
Венера	1977-May-13	20,	E	769	3829	14,36		2006	AR
Венера	1977-May-13	247,	E	769	3765	24,32	НАВ	2026	AR
1566 Icarus	1968-Jun-14	1,49	G	2388	66578	80,83		2130	AR
Венера	1977-Mar-24	79,9	E	769	5763	99,94	НАВ	2177	SKA
29075 (1950 DA)	2001-Mar-04	3,46	G	8560	89656	103	НАВ	2207	ADU
1566 Icarus	1968-Jun-14	8,74	G	2388	67109	143,8		2256	AR
Венера	1973-Sep-05	169,33	G	2320	64688	143,61	НАВ	2261	DSN
Меркурий	1982-Jun-12	288,3	E	769	20542	145,8		2274	SKA
Венера	1975-Sep-07	166,75	E	769	48273	149,68		2275	SKA
2006 UQ17	2007-Feb-01	0,74	A	2380	86950	143,99		2295	AR
Марс	1971-Aug-24	309,1	E	769	104864	161,95		2295	SKA
Венера	1971-Apr-04	15,6	G	2320	111910	167,27	НАВ	2305	AR
2003 SR84	2003-Sep-27	0,99	G	8560	22044	157,26		2318	DSN
Меркурий	1982-May-29	21,52	E	769	22350	168,91		2320	SKA
Венера	1970-Oct-05	158,34	E	769	74229	185,86		2342	SKA
Венера	1970-Nov-04	176,33	E	769	74229	185,86		2342	SKA
Марс	1971-Aug-25	196,59	E	769	104764	194,98	НАВ	2361	SKA
101955 (1999 RQ36)	2005-Sep-19	7,07	G	8560	24923	178,53		2363	DSN
Венера	1980-Feb-21	183,42	E	769	4014	194,05		2368	SKA
1566 Icarus	1968-Jun-14	3,54	H	7840	69738	202,11	НАВ	2372	SKA
1566 Icarus	1968-Jun-14	7,96	G	2388	69738	202,11	НАВ	2372	AR
Венера	1973-Mar-28	138	G	2320	1437	200,74		2374	AR
Венера	1982-Jan-30	108,72	E	769	97423	203,75		2389	SKA
2005 OE3	2005-Aug-21	9,33	G	8560	81656	198,3		2402	DSN
Венера	1971-Aug-23	88,52	G	2320	49617	219,09		2410	AR
Меркурий	1982-May-22	144,96	E	769	22972	221,47	НАВ	2425	SKA
1998 BY7	1998-Feb-21	2,84	G	8510	96264	214,61		2427	AR
Венера	1973-Aug-28	86,15	G	2320	61921	229,9		2433	AR
101955 (1999 RQ36)	1999-Sep-23	2,95	G	8560	30665	246,41		2492	AR
Венера	1969-Apr-22	115,79	E	769	2873	272,8	НАВ	2514	SKA
Венера	1980-Mar-01	132,73	E	769	6818	268,98		2518	SKA
Венера	1986-Oct-31	186,15	E	769	72247	268,09		2523	SKA
1990 OS	2003-Nov-11	3,38	G	8560	65951	263,33		2530	AR

Марс	1986-Jul-25	390	E	769	93479	274,87	HAB	2536	SKA
Венера	1973-Mar-27	139,7	G	2320	1397	288,5		2550	AR
Венера	1969-Apr-21	165,58	E	769	3057	301,57	HAB	2572	SKA
1566 Icarus	1968-Jun-15	4,55	H	7840	70791	307,84		2584	SKA
1566 Icarus	1968-Jun-15	8	G	2388	70791	307,84		2584	SKA
Венера	1975-Aug-10	130	E	769	52454	304,39		2584	SKA
Марс	1980-Apr-12	150	E	769	48881	304,96		2590	SKA
Венера	1972-Jul-02	124,13	E	769	24533	311,66	HAB	2595	SKA
2001 EB18	2002-Aug-28	1,88	A	2380	59527	299,63	HAB	2601	AR
1566 Icarus	1968-Jun-14	2,19	H	7840	69721	324,7	HAB	2617	SKA
1566 Icarus	1968-Jun-14	7,74	G	2388	69721	324,7	HAB	2617	SKA
Венера	1980-Apr-02	99,89	E	769	17572	336,78		2653	SKA
Венера	1975-Oct-10	188,61	E	769	50462	339,23		2654	SKA+
2004 DC	2006-Jun-03	1,95	G	8560	1067	332,99		2672	AR
Венера	1975-Sep-14	144,88	E	769	47639	350,91	HAB	2677	SKA+
1990 OS	2003-Nov-12	2,71	G	8560	62059	347,92	HAB	2699	AR