

УДК 52-125+573.52(15)

ПРЯМЫЕ И КОСВЕННЫЕ ТЕХНОМАРКЕРЫ — ЧТО ОБНАРУЖИМ РАНЬШЕ?

© 2025 Э. Халики^{1*}¹Эгейский университет, Измир, 35040 Турция

Поступила в редакцию 21 января 2024 года; после доработки 28 марта 2025 года; принята к публикации 17 апреля 2025 года

Для обнаружения техномаркеров разумных цивилизаций уже испробовано множество методов и еще больше тестируется в настоящее время. Одно можно сказать точно: присутствующий техномаркер изменил бы свою окружающую среду заметным образом. В настоящей работе были изучены все возможные прямые и косвенные техномаркеры, начиная от радиомаяков до мегаструктур Дайсона и от самовоспроизводящихся зондов до предполагаемых звездных двигателей, чтобы определить, в какой степени эти техномаркеры могут проявиться в пределах заданной конечной сферы диаметром 500 световых лет, что соответствует почти половине средней толщины нашей Галактики. Затем оценены вероятности обнаружения таких техномаркеров на основе областей, или доменов, которые они могут создать, и исследовано, существует ли корреляция с положением цивилизаций на шкале Кардашева. Далее изучено, какие из прямых и косвенных техномаркеров имеют более высокую вероятность обнаружения.

Ключевые слова: *техномаркеры*

1. ВВЕДЕНИЕ

С незапамятных времен человечество наблюдало за небесными телами и пыталось выяснить, одни ли мы во Вселенной. Стремление исследовать свидетельства существования внеземной жизни завораживает воображение и подпитывает бесчисленные научные попытки дать ответ. В эпоху технологических прорывов ученые обратили свое внимание на захватывающую концепцию техномаркеров — потенциально возможных проявлений (технологической) деятельности высокоразвитых цивилизаций за пределами Солнечной системы.

Техномаркерами называют детектируемые признаки разумной внеземной деятельности, которые можно наблюдать или обнаруживать теми или иными способами с определенного расстояния. Эти предполагаемые признаки могут варьироваться от электромагнитных излучений до едва заметных изменений в окрестностях планеты или инженерных мегаструктур. По мере того как мы расширили наше понимание Вселенной и усовершенствовали методы, поиск техномаркеров стал неотъемлемой частью научного поиска внеземного разума (Socas-Navarro et al., 2021; Lingam et al., 2023). На самом деле техномаркеры можно разделить на две группы: прямые и косвенные. Прямые техномаркеры охватывают преднамеренные попытки

развитых цивилизаций установить контакт с другими разумными существами в космической бесконечности. Такие сообщения могут принимать различные формы, варьируясь от простых радиосигналов до очень сложных зашифрованных передач. Эти преднамеренные техномаркеры потенциально могут служить средством установления контакта, обмена знаниями и/или инициирования межзвездной связи. Косвенные техномаркеры подразумевают непреднамеренное или косвенное подтверждение существования развитых цивилизаций путем обнаружения астроинженерных мегаструктур или крупномасштабных инженерных проектов в нашей Галактике. Обнаружение такой мегаструктуры может предоставить нам надежные доказательства присутствия разумных существ, способных манипулировать окружающей средой.

Прямые техномаркеры включают в себя радиомаяки METI (Messaging to Extra-Terrestrial Intelligence, передача сообщений внеземному разуму), кольца Дайсона, модулирующие сигналы пульсаров, и зонды Брейсвелла (Bracewell probes). Радиомаяки METI — это инженерные сооружения, которые предназначены для намеренного излучения сигналов, указывающих на местоположение передающей планеты, или для потенциально-го контакта с другими цивилизациями. Они могут быть расположены на поверхности планеты или на орбите вокруг нее. Когда-то программа METI стала традиционным направлением поиска путей

*E-mail: ehaliki@gmail.com

установления связи с предполагаемыми разумными цивилизациями за пределами Земли. Известной попыткой было сообщение Аресибо, отправленное в 1974 г. из обсерватории Аресибо (Пуэрто-Рико) и представлявшее собой тщательно продуманную радиопередачу, направленную в сторону шарового скопления М 13, которое расположено примерно в 22 000 световых лет от нас. Сообщение, переданное в двоичном коде, содержало данные о положении Земли в космосе, структуре ДНК, очертаниях человеческого тела и другие научные сведения (Center, 1975). Пригодны ли шаровые скопления для жизни, до сих пор является предметом обсуждения (Di Stefano and Ray, 2016; Grimaldi et al., 2021), и сообщение Аресибо — это скорее символический жест, демонстрирующий технологические возможности человечества, а не практическое средство общения. Концепция модулирующих сигнал колец Дайсона вокруг пульсаров была разработана на основе идеи о том, что развитые цивилизации могли бы использовать пульсары, которые являются естественными радиисточниками, в качестве радиомаяков (Chennamangalam et al., 2015). Радиосветимость и движение конуса излучения пульсаров делают их пригодными для радиопередачи в их окрестностях на большие расстояния. Если бы развитая цивилизация контролировала несколько пульсаров, она могла бы транслировать радиосигналы на значительную часть своих окрестностей, заявляя о своем существовании. Зонды Брейсвелла — это автономные системы для навигации в межзвездном пространстве. Их предназначение — сообщать по мере продвижения о своем местонахождении, испуская радиоволны. Другими словами, они могут использоваться для исследования потенциальной внеземной жизни в Галактике, представляясь другим возможным существам как рой независимых радиомаяков METI. Если бы они обладали способностью к самовоспроизводству, то могли бы быть в высокой степени экспансивными, как зонды фон Неймана (von Neumann) (Ellery, 2022).

Косвенные техномаркеры включают в себя сферы Дайсона, кольца, рои для сбора энергии, зонды фон Неймана, экуменополисы, звездные двигатели, такие как двигатели Шкадова или Каплана, кольцевые миры, мозги-матрешки, космические солнечные энергетические системы и орбитальные кольца. Сферы Дайсона — это массивные монолитные конструкции, которые потенциально могут охватывать всю звезду или звездный остаток, используя их энергетическую мощность в огромных масштабах (Wright, 2020). Кольца Дайсона образуют кольцообразную конфигурацию вокруг своих хозяйских звезд или звездных остатков, служащую для улавливания и использования значительной части выделяемой ими энергии (Osmanov and

Berezhiani, 2019). Рои Дайсона включают в себя огромное количество независимых накопителей или спутников, рассеянных по орбите звезды или звездного остатка, вместо одной монолитной конструкции (Haliki, 2020; Smith, 2022). Зонды фон Неймана созданы для автономного самовоспроизводства с использованием локальных ресурсов для исследования и распространения по всему космосу. Концепция зондов определяет их как высокотехнологичные роботизированные космические аппараты, способные приземляться на небесное тело, извлекая и используя необходимые материалы из окружающей среды для создания своих копий. Эти новые зонды могут быть отправлены в другие звездные системы или места для продолжения цикла репликации и исследований (Matloff, 2022). Экуменополис — это концепция гипотетической планеты или небесного тела, вся поверхность которого плотно урбанизирована и заселена глобальной цивилизацией. Там может практически не остаться естественной или нетронутой почвы (и океана, если таковой имеется), а вся поверхность планеты может быть покрыта городами, инфраструктурой и сооружениями. Это было бы вершиной урбанизации и цивилизации, где население и технологическое развитие достигли уровня, когда используется каждый дюйм пригодного для обитания пространства (Beatty, 2022). Двигатель Шкадова представляет собой создание массивной отражающей поверхности, полуохватывающей звезду — гигантский солнечный парус. Согласно замыслу, он должен наклоняться, чтобы отразить часть излучения от естественного пути. Таким образом, создавая постоянное давление на отражающую поверхность, звезда будет перемещаться вслед за парусом. Регулировка положения и ориентации отражающей поверхности позволила бы на очень длительных временных масштабах управлять движением звезды, а также связанных с ней небесных тел или конструкций вокруг нее (Svoronos and Caplan, 2021). Идея двигателей Каплана также связана с межзвездной тягой. Работающий аналогично ракете, активный термоядерный двигатель Каплана может выбрасывать потоки фотонных частиц для создания поступательной тяги, что потребует расхода миллионов тонн топлива в секунду (Caplan, 2019). Кольцевой мир обычно описывается как колоссальное кольцо с радиусом астрономических размеров, эквивалентным миллионам километров. Предполагается, что оно будет изготовлено с использованием передовых материалов и технологий и предназначено для обеспечения пригодного для жизни пространства на внутренней поверхности кольца, гравитация которой имитируется центробежной силой, поскольку вращение кольца создает направленную наружу силу, имитирующую силу тяжести. Внутренняя поверхность кольцевого мира может быть достаточно обширной, чтобы

обеспечить богатое жизненное пространство для большого населения и создать разнообразие окружающей среды и экосистем. Она может включать в себя ландшафты, города и различные формы искусственной среды обитания (Isto, 2019). Мозг-матрешка создает сверхразумную вычислительную систему огромного масштаба и мощности. Предполагается, что он окружает звезду или улавливает значительную часть ее энергии сферой Дайсона в виде серии концентрических оболочек или конструкций, каждый слой которых использует энергию звезды для вычислительных целей. Оболочки или слои мозга-матрешки могут функционировать как большие вычислительные субстраты, используя энергию звезды для обеспечения работы сложных систем искусственного интеллекта. Энергия может преобразовываться в вычислительную мощность для поддержки масштабных вычислительных возможностей и когнитивных способностей (Berry et al., 2022). Космические солнечные электростанции (КСЭС) могут состоять из больших солнечных панелей, вращающихся вокруг планеты, где они постоянно находятся под воздействием солнечного света без атмосферных помех или смены дня и ночи. Панели могут превращать энергию звезды в электричество, которое затем преобразуется в форму, пригодную для беспроводной передачи, включая микроволновые или лазерные лучи (Rodenbeck et al., 2021). Орбитальное кольцо, также известное как орбитальный космический лифт или космический фонтан, представляет собой гипотетическую мегаструктуру, опоясывающую планету или небесное тело в космосе. Орбитальное кольцо предназначено для облегчения транспортировки и запуска космических аппаратов (Birch, 1982).

Будь то прямой или косвенный техномаркер, его физический размер, максимальное расстояние, на которое он излучает, и некоторые другие параметры могут быть определены. Далее, геометрия излучения определяет область, или домен, на который этот техномаркер воздействует. Более того, отношение объема области излучения внутри конечной сферы к объему этой сферы дает процентную долю домена. Некоторые из таких доменов показаны на рис. 1 как области изотропного излучения, конуса излучения и вращающегося конуса излучения (панели (а), (b) и (с) соответственно). Если определить все потенциальные типы техномаркеров, связанных с внеземной разумной жизнью, рассмотренные и теоретически смоделированные на настоящий момент, с учетом их доменов, то можно провести ранжирующую оценку возможности их обнаружения. Цель данной статьи — ранжировать домены как прямых, так и косвенных техномаркеров, а также установить количественную взаимосвязь между доменами и возможностью их обнаружения.

Поскольку такая взаимосвязь может дать представление о типах техномаркеров, с которыми мы, скорее всего, столкнемся в первую очередь, что может быть актуально для потенциальной коммуникации в будущем.

2. ДОМЕНЫ ПРЯМЫХ ТЕХНОМАРКЕРОВ

2.1. Радиомаяки METI

Что касается радиомаяков METI, то их сигнал будет расходиться и рассеиваться по мере увеличения расстояния, поэтому он должен передаваться с высокой мощностью и быть в значительной степени сфокусированным. Чтобы определить требуемую мощность передатчика радиомаяка, можно задать соотношение между передаваемой и принимаемой мощностями:

$$P_t = mkTb \frac{4\pi \sin^2(\theta/2) R_d^2}{A_r}, \quad (1)$$

где P_t — передаваемая мощность, m — отношение сигнал/шум (SNR), k — постоянная Больцмана, T — шумовая температура, b — полоса пропускания сигнала, множитель $4\pi \sin^2(\theta/2)$ — телесный угол радиолуча, R_d — дальность обнаружения, A_r — площадь приемника, $mkTb$ определяет мощность приемника (P_r). Послание Аресибо было передано с мощностью приблизительно 4.2×10^{12} эрг с⁻¹, так чтобы его можно было расшифровать радиотелескопом с аналогичными возможностями, расположенным на большом расстоянии. Мощность, с которой было отправлено сообщение, позволит ему преодолеть 22 000 св. лет (6.75 кпк) за счет фокусировки в чрезвычайно узком луче.

Важно добавить, что зона обитания в Галактике (Spitoni et al., 2014) совпадает со спиральными рукавами; толщина этих областей составляет приблизительно 1000 св. лет. Объем, соответствующий сфере такого диаметра, можно принять за максимальный объем конечной сферы, используемой в расчетах доменов техномаркеров в данном исследовании. Это связано с тем, что вероятность нахождения развитой цивилизации в пределах обитаемой зоны Галактики выше по сравнению с другими областями. Возникает необходимость расчета того, как сообщение, подобное посланию Аресибо (Center, 1975), занимало бы пространство в пределах расстояния 500 св. лет относительно всей конечной сферы, при условии, что передающая планета находится в центре сферы. Однако, если бы сообщение из Аресибо было отправлено к цели, находящейся на расстоянии 500 св. лет, луч мог бы быть шире из-за относительно меньшего расстояния ($\theta \propto 1/R_d$). В предположении, что телескоп-приемник имеет параметры, аналогичные

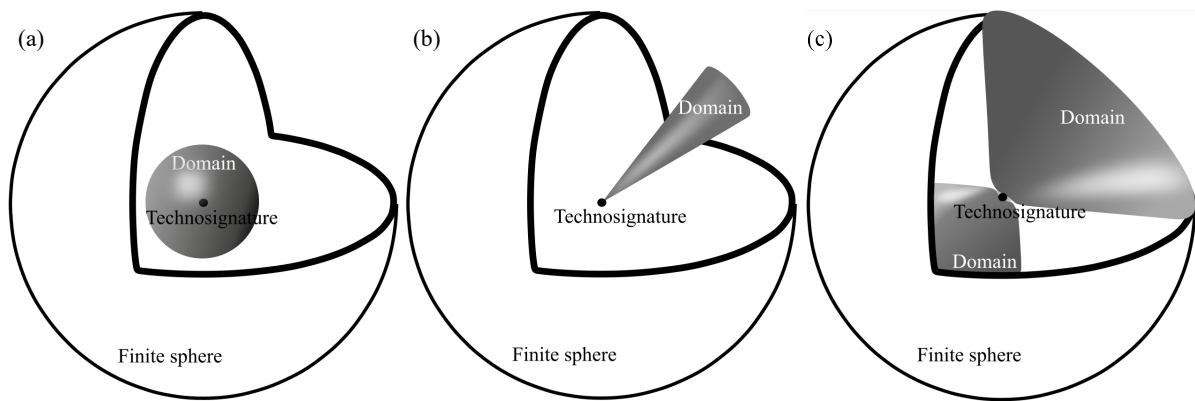


Рис. 1. Иллюстрация доменов, создаваемых центральными техномаркерами внутри конечной сферы. Панель (a) — сферическая структура, детектируемая как изотропное излучение; панель (b) — конус излучения радиомаяка; панель (c) — структуры, обусловленные конусами излучения, перемещающимися в пространстве, как у пульсаров.

параметрам телескопа Аресибо ($m = 10$, $b = 75$ Гц, $T = 20$ К), угол раствора конуса луча (2θ), полученный из уравнения (1), будет приблизительно равен $0^{\circ}006$.

Чтобы определить домен такого радиомаяка METI, который мог бы быть обнаружен телескопом, подобным Аресибо, с расстояния 500 св. лет, без учета требований к мощности сообщения, отправленного более развитой цивилизацией, необходимо рассчитать объем конуса излучения. Это объясняется тем фактом, что только приемники, находящиеся внутри конуса излучения, получают это сообщение. Указанный выше объем можно представить в виде сферического сектора:

$$V_{\text{beacon}} = \frac{2}{3}\pi R_d^3 \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right). \quad (2)$$

С учетом расстояния и угла раствора конуса, объем (домен) конуса излучения соответствует $1.7 \times 10^{-8}\%$ объема конечной сферы. Мощность передатчика развитой цивилизации, безусловно, может быть намного выше, чем у Аресибо (что позволит также увеличить телесный угол), поскольку такая развитая цивилизация могла бы использовать энергию естественных источников радиоизлучения, например пульсаров. Однако расчеты были сделаны для мощности в 4.2×10^{12} эрг с $^{-1}$.

Наряду с этим, если ориентироваться на оптическую связь, установка TAIGA-HiSCORE способна обнаруживать наносекундные оптические транзиенты, например генерируемые мощными лазерами, которые могут использоваться для межзвездной коммуникации. Этот метод позволяет отличать искусственные сигналы, в частности лазеры, от естественных космических явлений, таких как широкие атмосферные ливни, путем анализа однородности распределения оптических импульсов

по телескопам установки. Когерентные источники, подобные оптическим лазерам, могут излучать короткие импульсы, которые можно обнаружить на огромных расстояниях, в то время как некогерентные источники требуют компактности для обнаружения на расстоянии тысяч световых лет. Для эффективной трансляции необходим передатчик высокой мощности, например, с апертурой 1000 м, использующий зеленый лазер. Он способен передавать данные на расстоянии тысяч световых лет, требуя при этом энергии, сопоставимой с современными наземными лазерными системами. Возможность оптического обнаружения маяков METI подтверждается адаптируемостью TAIGA-HiSCORE к подобным задачам (Rapov et al., 2021). Очевидно, что технология оптической связи на основе лазера может быть обнаружена на огромных межзвездных расстояниях. В пределах конечной сферы радиусом 500 св. лет такой сигнал, вероятно, будет занимать область, аналогичную домену послания Аресибо с точки зрения обнаруживаемости и пространственного охвата.

2.2. Кольца Дайсона, модулирующие сигналы пульсаров

Являясь естественными радиоисточниками, пульсары излучают более мощные сигналы со значительно большими углами раствора конуса по сравнению с радиотелескопами. Максимальная дальность, на которой можно обработать и понять сообщение, передаваемое с помощью модуляции радиосветимости луча пульсара, составляет миллионы световых лет из-за большой плотности потока у пульсаров (Henry and Paik, 1969; Lorimer et al., 1995; Kijak and Gil, 1997; Lorimer and Kramer, 2005). Например, удастся обнаружить импульсы самого дальнего из открытых пульсаров, NGC 5907 X-1, расположенного на расстоянии

50 млн св. лет от нас (Heida et al., 2019). Если радиосигналы пульсаров модулируются кольцами Дайсона, перехватывающими вращающиеся лучи, при передаче сигнала не возникнет проблем с энергией. Чтобы вычислить все домены в одинаковых условиях, мы ищем техномаркеры в пределах нашей Галактики. С учетом того, что Млечный Путь имеет радиус приблизительно 50 000 св. лет, а наше местоположение находится почти в середине галактической обитаемой зоны, можно взять ранее определенную конечную сферу с радиусом $R_d = 500$ св. лет вокруг пульсара (равно как и вокруг других рассматриваемых техномаркеров).

Важно отметить, что любой механизм частотной или амплитудной модуляции сигнала, находящийся на орбите вокруг пульсара, не изменит его главного свойства: перемещения конусов радиоизлучения. Другими словами, любой пульсар излучает в космос два вращающихся конуса излучения. Вращение формирует объем охвата лучей пульсара, при этом наибольший угол наклона пульсара составляет $\alpha \sim 83^\circ$ (Haliki, 2019). Объем охвата, соответствующий α , может быть рассчитан следующим образом:

$$\begin{aligned} V_{\text{sweep}} &= \frac{2}{3}\pi[h_1(R_1^2 - R_2^2) \\ &+ h_2(R_1^2 + R_1R_3 - R_2R_3 - R_2^2)], \\ h_1 &= \frac{R_d}{\cos \rho} \cos(\alpha + \rho), \\ R_1 &= \frac{R_d}{\cos \rho} \sin(\alpha + \rho), \\ R_2 &= \frac{R_d}{\cos \rho} \cos(\alpha + \rho) \operatorname{tg}(\alpha - \rho), \\ h_2 &= 2R_d \sin \alpha \operatorname{tg} \rho, \\ R_3 &= \frac{R_d}{\cos \rho} \sin(\alpha - \rho). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь ρ — средний половинный угол раствора конуса у пульсаров, соответствующий приблизительно 6° . Таким образом, максимальный объем охвата может занимать 21% конечной сферы радиусом 500 св. лет.

2.3. Зонды Брейсвелла

Подобно зондам фон Неймана, каждый из этих межзвездных исследовательских аппаратов с их способностью к самовоспроизводству может стать передатчиком сигналов, если он используется как для колонизации, так и для связи. Поскольку существует сценарий копирования передатчиков сигналов вместе с зондами, это может быть более совершенная технология, чем у зондов фон Неймана (Bracewell, 1960). Зонды Брейсвелла могут

работать как посредники между планетными системами, отправляя сообщения или информацию на огромные расстояния. Опираясь на передовые технологии и, возможно, используя гравитационные маневры у планет или других небесных тел, зонды Брейсвелла могут достигать существенных скоростей и преодолевать значительные межзвездные расстояния с течением времени. Однако следует иметь в виду не только расстояния, которые они преодолевают.

Учитывая физические характеристики зондов, можно предположить, что они движутся со сверхсветовой скоростью в среде с определенной плотностью. Более того, зонды можно считать сферическими, а эффективные сечения взаимодействия их полусферы с веществом, накопленным во время перемещения, моделировать как круглые. Таким образом, скорость накопления массы может быть выражена следующим образом:

$$\frac{dM}{dt} = \pi r^2 \beta c m_0 n, \quad (4)$$

где r — радиус зонда, βc — доля скорости света ($0 \leq \beta < 1$), m_0 — средняя молекулярная масса среды, а n — средняя плотность частиц. Для масс зондов можно использовать уравнение $M = \frac{4}{3}\pi r^3 \xi \rho$, где ξ представляет долю накопленного материала, а ρ — среднюю плотность зонда. Подобно митотически делящейся популяции бактерий, время, необходимое каждому зонду для самовоспроизводства после достижения критического размера и увеличения своей массы до M , составляет $\tau = \frac{M}{dM/dt}$, что можно записать как

$$\tau = \frac{4r\xi\rho}{3\beta c m_0 n}. \quad (5)$$

Принимая N_0 за начальное число зондов, численность популяции через заданное время t можно рассчитать как $N(t) = 2^{t/\tau} N_0$. Если бы они двигались в относительно плотной среде со скоростью всего в один процент от скорости света и имели определенные значения параметров ($r = 0.01$ мм, $\xi = 0.1$, $\rho = 0.4$ г см $^{-3}$, $m_0 = m_H$, $n = 1$ см $^{-3}$, $N_0 = 100$), их популяция стала бы порядка 10^5 на расстоянии 4.2 св. года, которое является приблизительным расстоянием между Солнечной системой и ближайшей звездой (Haliki, 2020; Osmanov, 2020). Добравшись туда, они, несомненно, могли бы продолжать расширять свою популяцию, собирая материю вокруг себя, причем наиболее важными качествами были бы не только их размеры, но и численность.

Учитывая огромную численность, которой могут достичь самовоспроизводящиеся зонды даже

между Солнцем и Проксимой Центавра, можно только представить, какая популяция была бы у них при расстоянии 500 св. лет. Если далее предположить, что каждый зонд Брейсвелла передает радиосигнал, то совершенно очевидно, что их домен может занимать всю конечную сферу. Предположив, что радиосигнал с половинным углом раскрытия конуса, равным 6° , имеет телесный угол, равный 0.01π стерадиана, и что приблизительно 400 конусов, ориентированных в разных направлениях, образуют сферу (4π стерадиан), можно легко сделать вывод, что излучение 10^5 зондов было бы изотропным.

3. ДОМЕНЫ КОСВЕННЫХ ТЕХНОМАРКЕРОВ

3.1. Астроархеологические находки

Астроархеология исследует на планетарных телах потенциальные артефакты или следы вымерших цивилизаций, такие как аномальная структура поверхности или химический дисбаланс атмосферы. Эти следы могут включать заброшенные мегаструктуры, такие как разрушенные компоненты роя Дайсона, геометрически правильные и неправильные поверхностные образования, не соответствующие естественным процессам, или изотопные аномалии, вызванные ядерной активностью. Способы их обнаружения опираются на многоволновые наблюдения, спектроскопию и алгоритмы картирования аномалий. Обломки роя Дайсона (коллекторов энергии звезды) на орбите могут оставить заметный избыток инфракрасного излучения. Крупномасштабное терраформирование¹, например искусственные сети каналов, шахт или ирригационных систем, может сохраняться на протяжении тысячелетий. Крупномасштабная добыча полезных ископаемых также изменила бы локальный рельеф и спектр отражения. На безатмосферных телах, таких как Луна, подобные особенности сохраняются миллиарды лет. Концентрированные изотопные аномалии могут быть обнаружены с помощью гамма- или нейтронной спектроскопии (Campbell, 2005).

Что касается методов обнаружения и расстояний, то разрушенные мегаструктуры детектируются, например, в среднем ИК-диапазоне. Прибор MIRI космического телескопа «Джеймс Уэбб» может обнаружить избыток ИК-излучения на 10–20 мкм с чувствительностью приблизительно 1 мкЯн. Для звезды солнечного типа на расстоянии около 100 св. лет это соответствует обломкам, излучающим один процент светимости звезды

¹Изменение климата планеты для создания условий, пригодных для обитания.

(Kennedy and Wyatt, 2013). Следы поверхностных образований могут быть обнаружены путем съемки прямых изображений геометрических узоров с использованием новейшей адаптивной оптики и таких устройств, как прибор MICADO Чрезвычайно большого телескопа (Extremely Large Telescope, ELT). Дифракционный предел ELT на длине волны 1 мкм составляет около $0''.001$. Для 10-км объекта на экзопланете размером с Землю ($0''.01$ на расстоянии 20 св. лет) это требует примерно 10 пикселей для разрешения. Способность ELT разрешать 10-км объекты на Проксиме Центавра (4 св. года) была смоделирована и экстраполирована на 20 св. лет. Похожий сценарий обнаружения также применим к карьерам, связанным с добычей полезных ископаемых (Quanz et al., 2022). Для метода обнаружения ядерных изотопов необходимы линии γ -излучения от радиоактивного распада. Фотонный поток является критическим фактором при обнаружении ядерных изотопов с помощью γ -спектроскопии. Такие устройства, как спектрометр и камера Комптона (Compton Spectrometer and Imager, COSI), могут обнаруживать ядерные изотопы на максимальном расстоянии 300 св. лет при $SNR \geq 3$ (Siegal-Gaskins et al., 2011).

Техномаркеры, полученные в результате астроархеологических исследований, можно разделить на три категории: обломки мегаструктур, поверхностные образования и ядерные изотопы. В пределах ранее определенной конечной сферы их домены занимают 0.8%, 6.4×10^{-3} % и 21.6% соответственно.

3.2. Сферы Дайсона

Построение сферы Дайсона, функционирующей как каркас вокруг таких небесных тел, как звезды главной последовательности, пульсары, белые карлики и черные дыры звездных масс, потребовало бы тщательного учета гравитационных и магнитосферных эффектов для достижения соответствующего радиуса. Поскольку эти небесные тела излучают в широком диапазоне длин волн, включая видимый свет, ультрафиолет и инфракрасное излучение, сфера Дайсона могла бы перехватывать и переизлучать значительную часть этой энергии, скорее всего, на более длинных волнах, попадающих в инфракрасный диапазон (Dyson, 1960). Различные исследования в этом направлении показывают, что сфера Дайсона была бы невидима из относительно отдаленных мест, а именно с расстояний в десятки тысяч световых лет, и ее можно было бы увидеть с максимального расстояния около 1 кпк (Zackrisson et al., 2018; Socas-Navarro et al., 2021). Сферическая область с таким радиусом может составлять 100% от конечной сферы, которую мы определили ранее.

3.3. Кольца Дайсона

Кольца Дайсона, рассматриваемые в данном разделе, не следует путать с кольцевыми мирами; это мегаструктуры, расположенные таким образом, чтобы использовать энергию центрального небесного тела. Кольцевые миры являются мегаструктурами, населенными непосредственно, и для их строительства требуется гораздо больше материала. Радиус как кольцевых миров, так и колец Дайсона может достигать обитаемой зоны вокруг центрального небесного тела. Однако у колец Дайсона могут быть и относительно небольшие радиусы. Подобно сферам Дайсона, кольца Дайсона тоже были бы видны в инфракрасном спектре. Поэтому многообещающим инструментом для наблюдения за этими кольцами является VLTI (Very Large Telescope Interferometer); с учетом его углового разрешения максимальное расстояние, на котором можно обнаружить кольцо Дайсона, составляет приблизительно 0.2 кпк (Boyajian et al., 2016; Osmanov, 2018).

Существует несколько факторов, касающихся возможности обнаружения колец Дайсона в оптическом спектре. Поскольку кольцо Дайсона лишь частично закрывает хозяйскую звезду, прямой свет от нее может проникать через промежутки. В результате система выглядит как звезда с периодическим потемнением или аномальным изменением блеска в видимом диапазоне длин волн. Кольцо может поглощать излучение звезды и переизлучать отработанное тепло в виде инфракрасного излучения, а также излучать в видимом свете вследствие коротковолнового теплового излучения в более коротких длинах волн. Кроме того, энергоемкая деятельность на кольцеобразной конструкции может способствовать появлению видимых транзитных сигналов. Орбитальное движение кольца Дайсона может вызывать изменяющиеся во времени отражения или затмения света звезды, что, вероятно, должно приводить к периодическим или нерегулярным аномалиям в видимом свете. В отличие от этого, полная сфера Дайсона была бы лишена такой динамики и выглядела бы как постоянный источник инфракрасного излучения (Osmanov, 2018; Raval and Srikanth, 2024).

С учетом вышеперечисленных факторов кольца видны в оптическом спектре. Ограничение наблюдений инфракрасным спектром сократило бы количество методов поиска техномаркеров. Поэтому необходимо исследовать видимость в оптическом диапазоне для тех мегаструктур, которые способны достигать температур 4000° К. Зависимость между радиусом кольца Дайсона и его болометрической светимостью может быть выражена следующим

образом:

$$R = \left(\frac{L}{8\pi\sigma T^4} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

где L — болометрическая светимость, σ — постоянная Больцмана, а T — температура мегаструктуры. Для телескопа с предельной звездной величиной m максимальное расстояние, на котором кольцо Дайсона радиусом R остается видимым для данной обсерватории, рассчитывается как

$$D_m = 10^{m/5} R \sqrt{\frac{\beta B_v(T)}{F_0}}, \quad (7)$$

где $B_v(T)$ — спектр излучения абсолютно черного тела, F_0 — спектральный поток, а β — некоторый параметр для угла излучения в радианах ($\beta \neq 1$ для пульсароподобных объектов). Если подставить в уравнение (7) максимальные значения, то такая большая звездная величина, как $m = 30$, дает $D_m \sim 7 \times 10^3$ кпк (Beckwith et al., 2006), что близко к 100% конечной сферы.

3.4. Рои Дайсона

В некоторых исследованиях предполагается, что по мере того как уровень потребления энергии будет продолжать расти, человечество в течение нескольких следующих столетий создаст рой Дайсона вокруг Солнца (von Hoerner, 1975; Mullan and Naqq-Misra, 2019). Но на данный момент наиболее подходящим способом поиска роев Дайсона вокруг небесных тел в космическом пространстве являются процессы необычного потемнения звезд. Одно такое явление, KIC 8462852 (звезда Табби, или звезда Бояджян), привлекло широкое внимание в научном сообществе из-за своей примечательной кривой блеска. Она демонстрировала необычные и нерегулярные падения яркости, которые нельзя было легко объяснить естественными причинами, такими как транзиты экзопланет. Эти необъяснимые потемнения натолкнули на предположение, что вокруг звезды существует рой Дайсона. Однако было установлено, что эти потемнения вызваны прохождением большого семейства комет. Они не соответствовали движению роя, предназначенного для перехвата энергии центральной звезды (Bodman and Quillen, 2016; Schuetz et al., 2016).

Наиболее фундаментальной характеристикой, ожидаемой от роев Дайсона, охватывающих большую часть или всю центральную звезду, является их постоянное вращательное движение. В тех случаях, когда звезда окружена не полностью, ожидается, что потемнение будет периодическим, но отличным от транзитов планет. Если рой вызывает значительное потемнение звезды, он

также может оставить после себя дополнительные наблюдаемые признаки, включая инфракрасное излучение и связанные с ним явления. Заметные события могут происходить, когда зонды передают энергию излучения, что, возможно, достигается за счет электромагнитной передачи энергии, накопленной в определенном месте. Мазероподобное или когерентное излучение от необычно тусклой звезды может служить признаком передачи энергии в рое Дайсона, принадлежащем развитой цивилизации (Haggar and Schulze-Makuch, 2010; Inoue and Yokoo, 2011; Haliki, 2020).

Здесь возникает необходимость в различении роев Дайсона. Рой, полностью окружающий звезду, похож на сферу Дайсона, в то время как рой, частично окружающий звезду, можно было бы обнаружить с помощью метода планетных транзитов, а не потемнения звезд. Что касается частично закрытой звезды, то возможна кластеризация роя; в этом случае его можно было бы отличить от обычного планетного транзита и, следовательно, обнаружить с гораздо больших расстояний. SWEEPS-04, самая дальняя планета, обнаруженная с помощью метода планетных транзитов, вызывает гораздо меньшее потемнение, чем вызвал бы рой из большого количества зондов, расположенный на расстоянии 27 710 св. лет (Makov, 2015). Таким образом, домен роя Дайсона может занимать всю конечную сферу с ранее указанным радиусом. То есть мы можем предположить, что домены роев, как полностью, так и частично окружающих центральную звезду, соответствуют 100% конечной сферы.

3.5. Зонды фон Неймана

Концептуальные основы зондов фон Неймана и Брейсвелла представляют собой две различные парадигмы в области межзвездных исследований и коммуникаций, каждая из которых решает уникальные задачи, связанные с огромными масштабами времени и расстояний. Зонды Брейсвелла концептуализируются как автономные коммуникационные устройства, предназначенные для мониторинга звездных систем в поисках признаков разумной жизни и установления контакта, и потенциально обладающие способностью к самовоспроизводству. Зонды фон Неймана, напротив, теоретически рассматриваются как автономные самовоспроизводящиеся машины, спроектированные для экспоненциального распространения по звездным системам (Bracewell, 1960; Matloff, 2022).

Дальность обнаружения зондов фон Неймана зависит от нескольких факторов: уровня технологического развития цивилизации, которая их создала; источника энергии в зондах, позволяющего

им испускать излучение, которое можно обнаружить; их коммуникаций с создателями или другими зондами, как в случае с зондами Брейсвелла; стратегии воспроизведения и наблюдаемости в различных диапазонах частот. Все эти параметры можно интегрировать в соответствующую упрощенную модель. Процесс репликации может быть таким же, как у зондов Брейсвелла. Процесс захвата материала для самовоспроизводства, скорее всего, приведет к тепловому излучению. По мере сбора материала, вероятно, будет увеличиваться ускорение, возможно, за счет сильного магнитного поля, что может привести к появлению спектра синхротронного излучения.

Излучение, генерируемое зондами, можно считать в терминах спектрального потока. Для единичного случая захвата протона излучаемая энергия на единицу частоты может быть записана, как у Rybicki and Lightman (2024):

$$\frac{dW}{d\omega} = \frac{8\pi\omega^4}{3c^3} |d(\omega)|^2, \quad (8)$$

где ω — угловая частота излучения, а

$$d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{i\omega t} d\omega$$

является Фурье-компонентой дипольного момента. Таким образом, можно рассмотреть Фурье-преобразование его второй производной по времени и получить:

$$-\omega^2 d\omega = \frac{e}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{i\omega t} d\omega, \quad (9)$$

где e — заряд протона, а $a(t)$ — соответствующее ускорение при встрече с зондом. Время взаимодействия здесь можно определить как $\tau_0 = 2\kappa r/v$, где v — скорость зонда, r — радиус, а κ — безразмерный параметр (рассматриваемый как 0.1), характеризующий расстояние ускорения. Полагая значение a постоянным на протяжении всего времени взаимодействия, несложно показать, что

$$d\omega = \frac{ea}{\pi\omega^3} \left| \sin\left(\frac{\omega\tau_0}{2}\right) \right|. \quad (10)$$

Это сводит уравнение (8) к следующему:

$$\frac{dW}{df} = \frac{4\pi e^2 \beta^3}{3c} \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \sin^2\left(\frac{f}{f_0}\right), \quad (11)$$

где $f_0 = \beta c/2\pi\kappa r$, f — частота излучения, а $\omega = 2\pi f$. Суммарное излучение от роя зондов в единицу времени

$$\frac{dW}{dt df} = 2^{t/\tau} n N_0 \frac{4\pi e^2 r^2 \beta^3}{3} \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \sin^2\left(\frac{f}{f_0}\right). \quad (12)$$

Взяв приведенное выше уравнение, для $N_0 = 100$ можно получить спектральный поток порядка

10^{18} эрг с^{-1} Гц^{-1} . Если подставить это значение в уравнение (7) вместо $B_\nu(T)$, то с учетом, что спектральный поток для зондов, отправляемых очень развитой цивилизацией, растет экспоненциально, поскольку зонды увеличиваются в числе и продвигаются с подходящими скоростями, дальность их обнаружения может достигать 1.7 Мпк при высоких значениях m (Osmanov, 2020; Osmanov and Berezhiani, 2022). Это означает возможность охвата всей ранее обозначенной конечной сферы. Полагая, что зонды способны колонизировать галактику за разумный промежуток времени, проблем при их обнаружении не возникнет, поскольку домен довольно велик.

3.6. Экуменополисы

Некоторые техномаркеры могут проявляться в результате отражений или излучений от изменений на поверхности планеты. Отдельные искусственные изменения поверхности, вероятно, фиксируются при наблюдении с высоким пространственным разрешением, в то время как другие могут быть идентифицированы в интегрированном свете планеты. Один из наиболее заметных эффектов — огни ночного города. Например, самый высокий поверхностный поток на Земле составляет $47 \text{ эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$ (Нью-Йорк, Таймс-сквер), что является довольно низким показателем, поскольку урбанизация на нашей планете сосредоточена на определенных небольших участках всей поверхности (Haqq-Misra et al., 2022).

Средний поверхностный поток от Земли можно рассчитать как $0.035 \text{ эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Однако, если предположить наличие огромного города, охватывающего всю планету, включая сушу и океаны, то поверхностный поток мог бы достигать $63 \text{ эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Согласно данным команды LUVUOIR (Large Ultraviolet Optical Infrared Surveyor), экуменополис с таким потоком может быть обнаружен примерно с пятидесяти ближайших звезд (Haqq-Misra et al., 2022; LUVUOIR Team, 2019). Чтобы определить размер домена, можно рассмотреть самую дальнюю звезду из пятидесяти ближайших к Земле, двойную систему Gliese 412 (16 св. лет), предполагая, что поток от экуменополиса возможно обнаружить со всех направлений (изотропный). В этом случае средний размер домена экуменополиса для данного расстояния соответствует $8.3 \times 10^{-5} \%$ конечной сферы.

3.7. Двигатели Шкадова и Каплана

Звездные двигатели класса А, известные как двигатели Шкадова, конструктивно схожи с частичными сферами Дайсона, но отличаются от них

тем, что могут производить работу. Они основаны на массивной отражающей конструкции, подобной звездному зеркалу, для улавливания излучения звезды. Сила тяги определяется импульсом излучения и производит работу.

Двигатель создает предпочтительное направление в давлении излучения звезды. Для этого процесса подходящей геометрией была бы параболическая или сферическая зеркальная конструкция, и расчеты дают силу тяги, как показано ниже:

$$F = \frac{\tilde{L}_s}{2c} (1 - \cos \psi), \quad (13)$$

где $\tilde{L}_s$ — болометрическая светимость звезды, а ψ — полуугол конуса излучения (Badescu and Cathcart, 2000).

Двигатели Каплана, относящиеся к звездным двигателям класса С (звездными двигателями класса В являются сферы Дайсона), часто концептуализируются как включающие сферу Дайсона или подобную мегаструктуру из-за своих огромных энергетических потребностей и эксплуатационного масштаба. Конструкция работает за счет использования излучения звезды для приведения в действие мощного двигателя, что требует улавливания и перенаправления значительной части полной энергии звезды. Сфера Дайсона или частичный рой Дайсона являются идеальными решениями для этой цели, поскольку они могут эффективно собирать и использовать звездную энергию в масштабах, необходимых для межзвездного движения (Caplan, 2019).

Принцип действия двигателя Каплана напоминает работу ракеты. Огромная космическая станция, питаемая роем, может собирать звездное вещество для ядерного синтеза. Двигатель использует электромагнитные поля для подачи водорода и гелия из звездного ветра. Рой Дайсона может способствовать повышению эффективности. Тяга двигателя Каплана рассчитывается следующим образом:

$$F = \frac{\tilde{L}_s}{2c} \left(1 - e_{\text{int}} \frac{\theta_p^4}{\theta_s^4} \right) (1 - \cos \psi), \quad (14)$$

где e_{int} — коэффициент излучения внутренней поверхности конструкции, θ_s — отношение температуры звезды с двигателем Каплана к ее собственной температуре, а θ_p — отношение температуры двигателя Каплана к температуре звезды (Badescu and Cathcart, 2000). Тяга всех двигателей прямо пропорциональна болометрической яркости звезды, и другие факторы в уравнении не увеличивают ее радикально, а скорее уменьшают во время движения звезды, т.е. когда двигатели активны, это не приводит к дополнительному выбросу энергии.

Таким образом, можно считать, что домен двигателей Шкадова аналогичен домену сферы Дайсона, а домен двигателей Каплана такой же, как для роя Дайсона (частично инкапсулированного из-за пространства, отведенного для ракетоподобных ускорителей), причем оба домена охватывают всю конечную сферу.

3.8. Кольцевые миры

Стоит напомнить, что кольцевой мир — это не орбитальная кольцевая структура вокруг планеты, а скорее кольцо, расположенное вокруг излучающего энергию небесного тела, такого как звезда главной последовательности или белый карлик, и задуманное как среда обитания.

Обитаемость кольцевого мира накладывает определенные структурные и термодинамические ограничения по сравнению с кольцом Дайсона. Чтобы поддерживать центробежную силу, эквивалентную силе тяжести на поверхности планеты земного типа, радиус кольцевого мира должен превышать компактный размер кольца Дайсона, оптимизированный для сбора энергии. Кроме того, наличие биосферы приводит к появлению механизмов терморегуляции, отсутствующих в пассивных мегаструктурах Дайсона. Биологические процессы и динамика атмосферы снижают эффективную температуру (T_{eff}) кольцевого мира. Если в энергетическом балансе системы преобладает отраженное или накопленное излучение, а не прямое переизлучение, то T_{eff} можно записать в виде

$$T_{\text{eff}} = \left(\frac{L_* (1 - \alpha)}{16\pi^2 \sigma R^2} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (15)$$

где L_* — светимость хозяйской звезды, α — альбедо, подобное земному (0.3), а R — радиус кольцевого мира. Для кольцевого мира вокруг солнцеподобной звезды, учитывая солнечную светимость (3.83×10^{33} эрг с^{-1}) и предполагая среднюю температуру 280 К на внутренней обитаемой поверхности, мы можем рассчитать его радиус, переставив множители в уравнении (15) относительно R . Полученный радиус составляет почти 1.5×10^{11} м, что соответствует примерно 1 а.е. Исходя из предположения, что конструкция холодная и с низким спектральным излучением, можно провести аналогию между кольцевыми мирами и околосветными дисками. Диски должны находиться примерно на расстоянии, рассчитанном для кольцевого мира, и содержать достаточное количество вещества, необходимого для создания такой конструкции.

Одним из лучших примеров, соответствующих этим определениям, является околосветный диск вокруг относительно далекой звезды GG Tauri Ab.

Расположенная на расстоянии 140 пк, эта звезда служит индикатором максимального расстояния, на котором можно найти кольцевой мир (Brauer et al., 2019). С другой стороны, это расстояние близко к максимальной дальности обнаружения в оптическом спектре горячих колец Дайсона вокруг относительно небольших звезд главной последовательности спектральных типов K и M (Osmanov and Berezhiani, 2022), из чего следует, что домен может соответствовать 75% конечной сферы.

3.9. Мозги-матрешки

Эти гипотетические структуры, также известные как мозг Дайсона, являются, как следует из их названия, еще одной мегаструктурой Дайсона, предназначенной для разработки искусственного интеллекта и программного обеспечения, поэтому мозг-матрешка может основываться на любых мегаструктурах Дайсона, способных получать энергию от центрального небесного тела. Следовательно, расстояния обнаружения соответствуют расстояниям для мегаструктур Дайсона. Домен мозга-матрешки на базе сферы Дайсона или кольца Дайсона будет занимать 100% конечной сферы.

Концепция мозга-матрешки является расширением понятия сферы Дайсона. Существенная проблема здесь заключается в том, что если однажды будет обнаружена мегаструктура Дайсона, не сразу станет ясно, является ли она мозгом-матрешкой, другими словами, погрузилась ли высокоразвитая цивилизация в вычислительную вселенную.

3.10. КСЭС и орбитальные кольца

Концепцию космических солнечных электростанций (КСЭС) можно рассматривать как спутниковый рой, опоясывающий планету наподобие экзопояса Кларка. Обнаружение техномаркеров с ограниченным количеством элементов, аналогичных современным спутникам Starlink, является довольно сложной задачей, что уже делает ее домен незначительным. Излучение от техномаркеров, сопоставимое с нашим современным технологическим уровнем, было бы практически незаметным на уровне фона при межзвездных расстояниях, если только оно не было бы намеренно направлено в нашу сторону, как маяк METI (Socas-Navarro, 2018).

По своему принципу действия КСЭС могут находиться на геостационарных и геосинхронных орбитах планеты, поскольку высокие орбиты более подходят для эффективной передачи энергии, которую они почти постоянно получают от звезды, на станции планеты. В исследованиях, проведенных по этому вопросу, также упоминаются низкие орбиты, поскольку эффективность передачи

энергии снижается при больших расстояниях из-за механизмов, с помощью которых спутники будут передавать энергию на планету, таких как микроволны или лазеры (Jakhu and Pelton, 2017; Mishra and Mishra, 2023). Однако более развитая цивилизация могла бы решить проблему уменьшения мощности электромагнитного излучения при передаче энергии и увеличить количество спутников. По этим причинам большое количество КСЭС на геостационарных и геосинхронных орбитах планеты может образовывать кольцевую структуру, подобную экзопоясу Кларка, аналогичную орбитальному кольцу. Таким образом, для обоих техномаркеров можно установить общие дальность обнаружения и домен.

На каменистых планетах редко встречаются естественные кольцевые системы, что делает любые кольцеобразные структуры вокруг них потенциальными техномаркерами. Хотя экзопояса теоретически могут быть обнаружены на больших расстояниях, чем экзопоясы, их малые угловые размеры и низкая светимость делают существующие возможности наблюдений недостаточными. Например, Socas-Navarro (2018) смоделировал пороговые значения обнаруживаемости, используя системы, аналогичные TRAPPIST-1 (39.6 св. лет), в качестве теоретического ориентира, хотя в таких системах нет подтвержденных естественных колец. Будущая фотометрия с высоким разрешением может преодолеть эти ограничения, но нынешним обзорам, таким как TESS, не хватает чувствительности, чтобы различать экзопояса даже на таких расстояниях. В некоторых исследованиях продемонстрированы трудности с обнаружением кандидатов в экзопояса Кларка, например в системе Kepler-10, которая находится в четыре раза дальше, чем TRAPPIST-1 (Sallmen et al., 2019). Таким образом, учитывая дальность обнаружения, соответствующую TRAPPIST-1, можно рассчитать, что домен для спутниковой группировки КСЭС или для орбитального кольца вокруг обитаемой планеты занимает $4.9 \times 10^{-2}\%$ конечной сферы.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего следует определить вероятность обнаружения техномаркера, расположенного в пределах конечной сферы. Вычисленные вероятности для всех возможных техномаркеров, основанные на процентном соотношении доменов в объеме указанной конечной сферы (радиус 500 св. лет), приведены в таблице 1 вместе с типами техномаркеров и их ожидаемым положением на шкале Кардашева (Kardashev, 1964). В настоящей статье упоминается в общей сложности 21 тип техномаркеров, что может быть достаточным

количеством для создания статистически значимого распределения вероятностей, позволяющего интерпретировать корреляцию между размером домена каждого техномаркера и типом цивилизации по оригинальной шкале Кардашева, состоящей из трех уровней развития.

Из таблицы 1 видно, что приблизительная вероятность обнаружения техномаркера положительно коррелирует с типом цивилизации по шкале Кардашева, что является ожидаемым результатом. Например, сигнал радиомаяка METI, посланный человечеством, был направлен в пределах чрезвычайно узкого телесного угла, поскольку нашей мощности было достаточно только для такой передачи, и поэтому у него небольшой домен. При более высоких уровнях энергопотребления, соответствующих цивилизации I типа, домен расширяется вместе с углом раскрытия конуса излучения, и целью уже может быть не только одиночное шаровое скопление. Цивилизация, способная построить экзопояс, должна иметь уровень потребления энергии, соответствующий I типу, что позволит ей контролировать всю окружающую среду на своей планете. Для создания крупной спутниковой группировки КСЭС или орбитального кольца, что как минимум требует достаточного количества материала, она также должна соответствовать I типу. Что касается мегаструктур вокруг энергетических небесных тел, предполагается, что цивилизация II типа сможет построить их все: от кольцевого мира до всех мегаструктур Дайсона, включая, кроме прочего, и двигатель Каплана. Разница в температуре и варьирующаяся спектральная яркость этих мегаструктур объясняют, почему в одних случаях вероятность их обнаружения максимальна, а в других — низка. Граница для цивилизаций III типа, охватывающая галактические цивилизации и уровни их энергопотребления, соответствует максимальным вероятностям обнаружения в пределах заданной конечной сферы. Можно предположить, что самовоспроизводящиеся зонды, подобные предложенным фон Нейманом и Брейсвеллом, могут быть разработаны цивилизацией II типа. Однако по сравнению с цивилизациями III типа время, необходимое для достижения численности, способной охватить почти всю Галактику, а также для создания инфраструктуры, использующей небесные тела в качестве источников энергии в местах своего распространения, может быть значительным, если только они не перемещаются с релятивистскими скоростями. Таким образом, размеры доменов, вероятно, будут находиться в пределах диапазона, связанного с техномаркерами, производимыми цивилизациями, по крайней мере, промежуточными между II и III типом.

Обнаружено, что коэффициент корреляции Пирсона между типами цивилизаций и прибли-

Таблица 1. Типы цивилизаций по шкале Кардашева и вероятности обнаружения в пределах конечной сферы для прямых и косвенных техномаркеров. Примерные вероятности обнаружения перечислены в порядке возрастания

Техномаркер	Тип техномаркера	Тип цивилизации	Оценка вероятности
Маяки МЕТИ	Прямой	0—I	1.7×10^{-10}
Астроархеологические поверхностные образования	Косвенный	0—I	6.4×10^{-5}
Экуменополис	Косвенный	I	8.3×10^{-5}
КСЭС	Косвенный	I	4.9×10^{-4}
Орбитальное кольцо	Косвенный	I	4.9×10^{-4}
Астроархеологические обломки мегаструктур	Косвенный	II	8.0×10^{-3}
Астроархеологические ядерные изотопы	Косвенный	II	0.21
Кольцо, модулирующее сигнал (пульсар)	Прямой	II	0.21
Кольцевой мир	Косвенный	II	0.75
Мозг-матрешка в кольце Дайсона	Косвенный	II	1
Двигатель Шкадова	Косвенный	II	1
Сфера Дайсона	Косвенный	II	1
Мозг-матрешка в сфере Дайсона	Косвенный	II	1
Рой Дайсона (закрывающий звезду)	Косвенный	II	1
Мозг-матрешка в рое Дайсона (закрыв. звезду)	Косвенный	II	1
Рой Дайсона (частичное покрытие)	Косвенный	II	1
Мозг-матрешка в рое Дайсона (частичное покр.)	Косвенный	II	1
Двигатель Каплана	Косвенный	II	1
Кольцо Дайсона	Косвенный	II	1
Зонды фон Неймана	Косвенный	II—III	1
Зонды Брейсвелла	Косвенный	II—III	1

зительными вероятностями (процентными долями доменов) составляет 0.73, если маяк МЕТИ и зонды учитывать как типы 0.7 и 3 соответственно. Это указывает на уровень корреляции от умеренного до высокого. Нелинейные коэффициенты, найденные путем вычисления непараметрических ранговых корреляций, составляют 0.74 (коэффициент Кендалла) и 0.79 (коэффициент Спирмена), что тоже демонстрирует высокий уровень корреляции. Наряду с этим аналогичная корреляция получена для астроархеологических техномаркеров. По мере повышения уровня развития цивилизации соответственно возрастает вероятность обнаружения остатков техномаркеров.

Мегаструктуры вокруг белых карликов, нейтронных звезд или черных дыр звездной массы также могут указывать на присутствие цивилизации, которая является более развитой, чем тип II, и попадает между типами II и III. Основная причина такого вывода заключается в том, что цивилизация может сначала нацеливаться на свою звезду глав-

ной последовательности, а затем на другие небесные тела. Исходя из предположения, что относительно примитивная, но разумная жизнь развивается вокруг звезд главной последовательности, а не вокруг остатков звезд, мегаструктуры вокруг звездных остатков могут указывать на цивилизации, распространяющиеся за пределы своих звезд. Цивилизация, выходящая за рамки II типа, способная к такой экспансии, может иметь большую часть своих техномаркеров за пределами заданной сферы радиусом в 500 св. лет. Тем не менее, поскольку мы не можем знать, что их первоначальная звезда не находится в непосредственной, но безопасной близости к звездному остатку, они не обязательно должны принадлежать к галактической цивилизации III типа и могут быть отнесены ко II типу.

Из представленных данных можно сделать вывод, что у прямых техномаркеров развитых цивилизаций домены, как правило, больше, чем у косвенных. Причина этого в том, что нечто, специально созданное для объявления о своем существовании,

ожидаемо должно охватывать больший пространственный объем. Радиомаяки МЕТІ можно исключить из данного обсуждения, поскольку существует множество исследований, предполагающих, что они будут не нужны цивилизациям, которые не хотели бы передавать данные о своем местоположении наугад, и что использование естественных источников сигнала, таких как пульсары, было бы более разумным (Chennamangalam et al., 2015; Haliki, 2019).

Данное исследование рассматривает домены в пределах ограниченной сферы и в рамках оригинальной шкалы Кардашева. Возможные более развитые межгалактические цивилизации вряд ли достижимы за время эволюции Вселенной (Gray, 2020), и поэтому они не исследовались. Кроме того, в настоящей работе проигнорированы техномаркеры, аналогичные варп-двигателям, с доменами, определяемыми гравитационными волнами, а не электромагнитным излучением. Проблемы, которые могут сделать эту технологию невозможной, включают нарушение общей теории относительности, закона сохранения энергии и второго закона термодинамики из-за отрицательной энергии, сопровождающей экзотическую материю, а также способность рассматриваемых квантовых полей достигать экстремальных плотностей и создавать сингулярность. Если появятся новые идеи для решения этих проблем, соответствующая технология может стать предметом дальнейшего изучения. Помимо этого, другие типы техномаркеров также могут обладать доменами, определяемыми гравитационными волнами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании приведены приблизительные размеры доменов техномаркеров, начиная от радиомаяков МЕТІ и заканчивая двигателями Каплана, и соответствующие вероятности их обнаружения. Размеры также могут варьироваться для конкретных техномаркеров. Например, анализ прямых техномаркеров показывает, что сигнал радиомаяка МЕТІ может распространяться на разные расстояния или иметь разное покрытие при разных углах раскрытия конуса излучения в зависимости от количества доступной энергии. В случае колец, модулирующих сигналы, углы наклона пульсаров могут быть разными и, таким образом, охватывать разные объемы пространства. То же самое относится к косвенным техномаркерам мегаструктур, размеры доменов которых могут значительно различаться. Кроме того, их обнаруживаемость может варьироваться для разных областей Галактики. Однако наиболее правдоподобный сценарий, рассматривающий выбранную конечную сферу в пределах галактической обитаемой зоны, которую предпочли бы даже развитые цивилизации

из-за подходящей металличности и низкой частоты появления сверхновых, дает общее представление о доменах, полученных на основе обнаруживаемости техномаркеров, и результирующих вероятностях. Учитывая предположение о существовании в нашей Галактике высокоразвитых цивилизаций, можно утверждать, что наиболее продвинутые по шкале Кардашева с большей вероятностью будут обнаружены первыми. В то же время, если у некоторых цивилизаций есть прямые техномаркеры для коммуникации, то они могут быть обнаружены раньше, чем более развитые. Даже если бы было известно, что в нашей Галактике нет других цивилизаций, это означало бы, что нынешняя Вселенная находится в младенческом возрасте по сравнению с ожидаемым сроком ее существования. Исходя из предположения, что люди эволюционировали как цивилизация, близкая к I типу на ранней стадии, можно, по крайней мере, ожидать появления различных разумных форм жизни в нашей Галактике.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор хотел бы поблагодарить анонимных рецензентов за ценные замечания и предложения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета организации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Badescu and R. B. Cathcart, J. British Interplanetary Society **53**, 297 (2000).
2. T. G. Beatty, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **513** (2), 2652 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac469
3. S. V. W. Beckwith, M. Stiavelli, A. M. Koekemoer, et al., Astron. J. **132** (5), 1729 (2006). DOI:10.1086/507302
4. T. Berry, A. Simpson, and M. Visser, Phys. Rev. D **106** (8), article id. 084001 (2022). DOI:10.1103/PhysRevD.106.084001
5. P. Birch, Journal of the British Interplanetary Society **35**, 475 (1982).
6. E. H. L. Bodman and A. Quillen, Astrophys. J. **819** (2), article id. L34 (2016). DOI:10.3847/2041-8205/819/2/L34
7. T. S. Boyajian, D. M. LaCourse, S. A. Rappaport, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **457** (4), 3988 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw218
8. R. N. Bracewell, Nature **186** (4726), 670 (1960). DOI:10.1038/186670a0

9. R. Brauer, E. Pantin, E. Di Folco, et al., *Astron. and Astrophys.* **628**, id. A88 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201935966
10. J. Campbell, Proc. IAU Coll. No. 200, Ed. by C. Aime and F. Vakili (Cambridge University Press, Cambridge, 2006), pp. 247–250. DOI:10.1017/S1743921306009392
11. M. E. Caplan, *Acta Astronautica* **165**, 96 (2019). DOI:10.1016/j.actaastro.2019.08.027
12. I. Center, *Icarus* **26** (4), 462 (1975). DOI:10.1016/0019-1035(75)90116-5
13. J. Chennamangalam, A. P. V. Siemion, D. R. Lorimer, and D. Werthimer, *New Astronomy* **34**, 245 (2015). DOI:10.1016/j.newast.2014.07.011
14. R. Di Stefano and A. Ray, *Astrophys. J.* **827** (1), article id. 54 (2016). DOI:10.3847/0004-637X/827/1/54
15. F. J. Dyson, *Science* **131** (3414), 1667 (1960). DOI:10.1126/science.131.3414.1667
16. A. Ellery, *International Journal of Astrobiology* **21** (4), 212 (2022). DOI:10.1017/S1473550422000234
17. R. H. Gray, *Astron. J.* **159** (5), id. 228 (2020). DOI:10.3847/1538-3881/ab792b
18. C. Grimaldi, M. Lingam, and A. Balbi, *Astron. J.* **162** (1), id. 23 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/abfe61
19. E. Haliki, *International Journal of Astrobiology* **18** (5), 455 (2019). DOI:10.1017/S1473550418000459
20. E. Haliki, *International Journal of Astrobiology* **19** (6), 474 (2020). DOI:10.1017/S1473550420000257
21. J. Haqq-Misra, E. W. Schwieterman, H. Socas-Navarro, et al., *Acta Astronautica* **198**, 194 (2022). DOI:10.1016/j.actaastro.2022.05.040
22. B. L. Harrop and D. Schulze-Makuch, *International Journal of Astrobiology* **9** (2), 89 (2010). DOI:10.1017/S1473550410000066
23. M. Heida, F. A. Harrison, M. Brightman, et al., *Astrophys. J.* **871** (2), article id. 231 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/aafa77
24. G. R. Henry and H. J. Paik, *Nature* **224** (5225), 1188 (1969). DOI:10.1038/2241188a0
25. M. Inoue and H. Yokoo, arXiv e-prints astro/ph:1112.5519 (2011). DOI:10.48550/arXiv.1112.5519
26. R. Isto, *Open Philosophy* **2** (1), 552 (2019). DOI:10.1515/opphil-2019-0039
27. R. S. Jakhu and J. N. Pelton, *Global Space Governance: An International Study* (Springer, Cham, Switzerland, 2017).
28. N. S. Kardashev, *Sov. Astron.* **8**, 217 (1964).
29. G. M. Kennedy and M. C. Wyatt, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **433** (3), 2334 (2013). DOI:10.1093/mnras/stt900
30. J. Kijak and J. Gil, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **288** (3), 631 (1997). DOI:10.1093/mnras/288.3.631
31. M. Lingam, J. Haqq-Misra, J. T. Wright, et al., *Astrophys. J.* **943** (1), id. 27 (2023). DOI:10.3847/1538-4357/acaca0
32. D. R. Lorimer and M. Kramer, *Handbook of Pulsar Astronomy*, (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).
33. D. R. Lorimer, J. A. Yates, A. G. Lyne, and D. M. Gould, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **273** (2), 411 (1995). DOI:10.1093/mnras/273.2.411
34. M. Y. Marov, *The Fundamentals of Modern Astrophysics: A Survey of the Cosmos from the Home Planet to Space Frontiers* (Springer, New York, 2015).
35. G. L. Matloff, *International Journal of Astrobiology* **21** (4), 205 (2022). DOI:10.1017/S1473550422000027
36. R. K. Mishra and A. K. Mishra, *Journal of Marine Science and Research* **2** (1), 4 (2023). DOI:10.58489/2836-5933/005
37. B. Mullan and J. Haqq-Misra, *Futures* **106**, 4 (2019). DOI:10.1016/j.futures.2018.06.009
38. Z. Osmanov, *International Journal of Astrobiology* **17** (2), 112 (2018). DOI:10.1017/S1473550417000155
39. Z. Osmanov, *Journal of the British Interplanetary Society* **73**, 1 (2020). DOI:10.48550/arXiv.2007.00693
40. Z. Osmanov and V. I. Berezhiani, *Journal of the British Interplanetary Society* **72**, 254 (2019). DOI:10.48550/arXiv.1909.08851
41. Z. N. Osmanov and V. I. Berezhiani, *Serbian Astronomical Journal* **205**, 53 (2022). DOI:10.2298/SAJ210922003O
42. A. D. Panov, I. I. Astapov, G. M. Beskin, et al., *Physics of Atomic Nuclei* **84** (6), 1037 (2021). DOI:10.1134/S1063778821130251
43. S. P. Quanz, M. Ottiger, E. Fontanet, et al., *Astron. and Astrophys.* **664**, id. A21 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202140366
44. T. Raval and D. Srikanth, arXiv e-prints astro/ph:2407.10624 (2024). DOI:10.48550/arXiv.2407.10624
45. C. Rodenbeck, P. Jaffe, B. Strassner, et al., *IEEE Journal of Microwaves* **1**, 229 (2021). DOI:10.1109/JMW.2020.3033992
46. G. Rybicki and A. Lightman, *Radiative Processes in Astrophysics* (John Wiley & Sons, Hoboken, USA, 2024).
47. S. Sallmen, E. J. Korpela, and K. Crawford-Taylor, *Astron. J.* **158** (6), article id. 258 (2019). DOI:10.3847/1538-3881/ab5300
48. M. Schuetz, D. A. Vakoch, S. Shostak, and J. Richards, *Astrophys. J.* **825** (1), article id. L5 (2016). DOI:10.3847/2041-8205/825/1/L5
49. J. M. Siegal-Gaskins, R. Reesman, V. Pavlidou, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **415** (2), 1074 (2011). DOI:10.1111/j.1365-2966.2011.18672.x
50. J. Smith, *Physica Scripta* **97** (12), id. 122001 (2022). DOI:10.1088/1402-4896/ac9e78
51. H. Socas-Navarro, *Astrophys. J.* **855** (2), article id. 110 (2018). DOI:10.3847/1538-4357/aaae66

52. H. Socas-Navarro, J. Haqq-Misra, J. T. Wright, et al., *Acta Astronautica* **182**, 446 (2021). DOI:10.1016/j.actaastro.2021.02.029
53. E. Spitoni, F. Matteucci, and A. Sozzetti, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **440** (3), 2588 (2014). DOI:10.1093/mnras/stu484
54. A. A. Svoronos and M. E. Caplan, *Acta Astronautica* **179**, 495 (2021). DOI:10.1016/j.actaastro.2020.11.030
55. LUVVOIR Team, arXiv e-prints astro/ph:1912.06219 (2019). DOI:10.48550/arXiv.1912.06219
56. S. von Hoerner, *Journal of the British Interplanetary Society* **28**, 691 (1975).
57. J. T. Wright, *Serbian Astronomical Journal* **201**, 61 (2020). DOI:10.2298/SAJ2001061E
58. E. Zackrisson, A. J. Korn, A. Wehrhahn, and J. Reiter, *Astrophys. J.* **862** (1), article id. 21 (2018). DOI:10.3847/1538-4357/aac386

Voluntary and Involuntary Technosignatures: Which Are To Be Encountered First

E. Haliki¹

¹Ege University, Izmir, 35040 Turkey

Numerous methods have been tried and many more are currently being attempted to discover technosignatures of intelligent civilizations. One thing is for sure: an existing technosignature would modify its environment in detectable ways. The current study has investigated all possible voluntary and involuntary technosignatures, ranging from beacons to Dyson megastructures and from self-replicating probes to the still hypothetical stellar engines, in order to determine the extent to which these technosignatures would reveal themselves within a specified finite sphere 500 light years across, corresponding to nearly half the average thickness of our Galaxy. We then estimated the probabilities of detection of such technosignatures based on the regions, or domains, they would produce and investigated whether or not a correlation exists with the position of civilizations on the Kardashev scale. The study further explored which ones of the voluntary and involuntary technosignatures have higher detection probabilities.

Keywords: *technosignatures*