

**ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС ДОСТИЖЕНИЙ ТАЛАНТЛИВОЙ
МОЛОДЁЖИ
«НАЦИОНАЛЬНОЕ ДОСТОЯНИЕ РОССИИ»**

Направление: АСТРОНОМИЯ, КОСМОНАВТИКА

**Тема: Определение пригодных для обитания экзопланет методом
моделирования их траекторий**

Соискатель: Лаврик Вера Сергеевна

Научный руководитель: Гусева Елена Владимировна

**Место выполнения работы: Школьный "Кванториум" при МАОУ СОШ
№2**

Содержание

1. Введение	3
2. Теоретическая часть	5
2.1. Звезды, их характеристики	5
2.2. Планетарные системы	9
2.3. Зона обитаемости	10
3. Построение физической модели зоны обитаемости	12
4. Построение компьютерной модели звездных систем	16
5. Заключение	24
6. Список используемой литературы	25
7. Приложение	26

Введение

Актуальность:

Изучение космоса идет достаточно активно, существование внеземной жизни волнует как ученых, так и обывателей, такие темы могут привлечь внимание и стимулировать интерес общественности.

Сравнение планет, похожих на Землю, с ней самой может помочь в понимании причин возникновения жизни, а этот вопрос стоит достаточно остро уже большое количество времени.

Земля не всегда будет пригодна для обитания нашего биологического вида, следовательно, человеку придется либо эволюционировать, либо искать новое место жизни, для этого можно использовать космические корабли, заниматься терраформированием или переселяться на уже подходящие для этой цели планеты.

Проблематика:

Не все экзопланеты, обнаруженные на данный момент, были анализированы для понимания того, пригодны они для жизни или нет.

Цель:

Выявить потенциально пригодные для обитания экзопланеты в звездных системах по близости к Солнечной по методу моделирования движения этих планет вокруг их родительских звезд.

Задачи:

- Сбор информации
- Анализ информации
- Составление моделей
- Фиксирование результатов
- Анализ моделей
- Составление статистики по полученным результатам

Гипотеза исследования:

Количество экзопланет потенциально пригодных для жизни крайне мало по сравнению с их общим количеством.

Объект:

Планеты различных планетарных систем

Предмет:

Движения планет вокруг звезд в зоне обитаемости

Методы:

Изучение, анализ, моделирование, идеализация, сравнение.

Практическая значимость:

Полученные результаты могут быть полезны для дальнейших исследований в этой области.

2.1 Звезды, их характеристики

Звезда — массивный самосветящийся астрономический объект сферической формы, состоящий из плазмы и газа, удерживаемой за счёт собственной гравитации, в котором происходят термоядерные реакции.

Жизнь на Земле существует во многом благодаря энергии излучения Солнца. Звезды классифицируются разными способами в зависимости от своих характеристик, в них входит в том числе и мощность излучаемой энергии.

Диаграмма Герцшпрунга — Рассела — диаграмма рассеяния, которая представляет зависимость между абсолютной звездной величиной и спектральным классом звезд, либо между другими величинами, которые тесно связаны с этими параметрами.

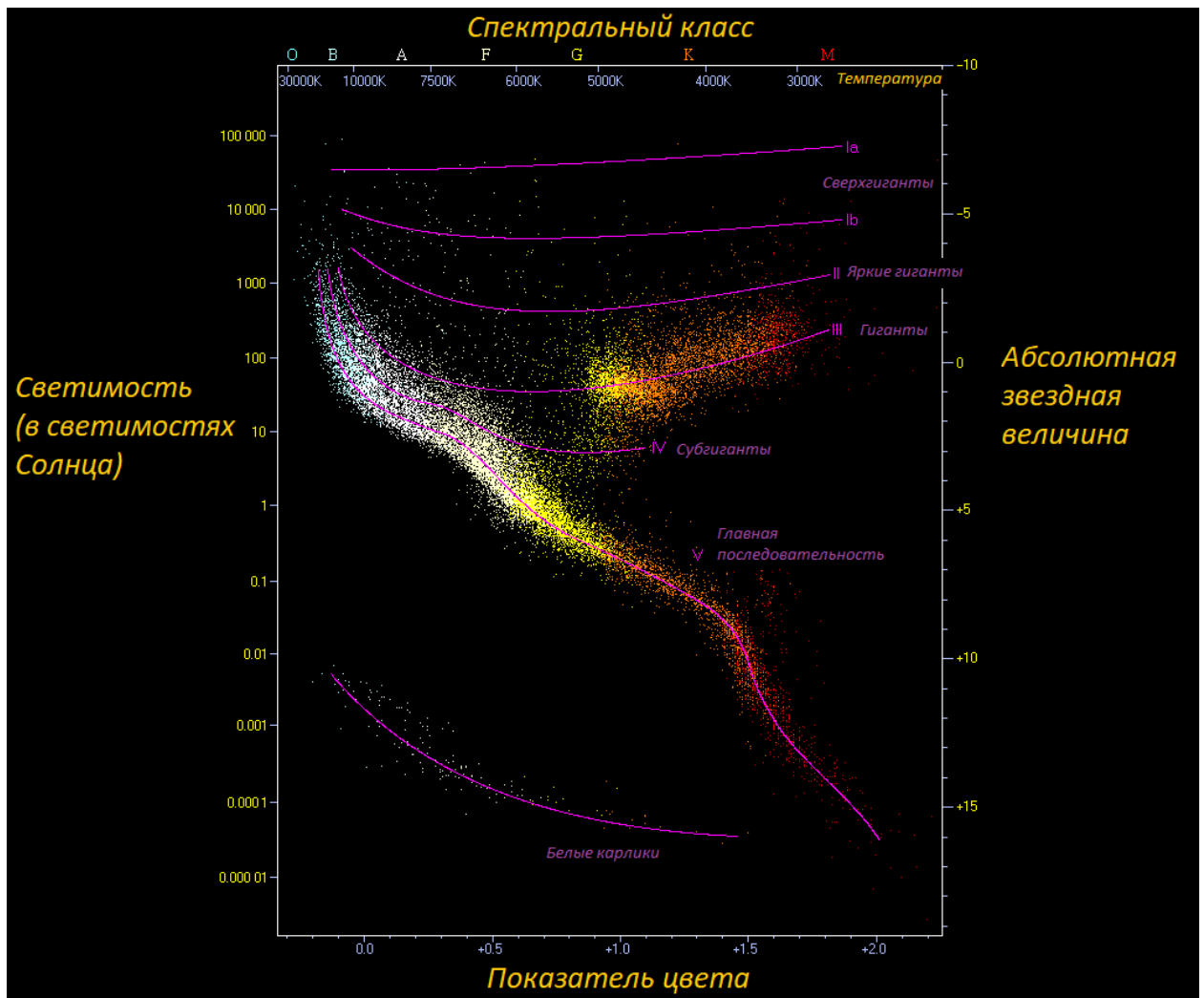
По горизонтали откладывается спектральный класс, либо температура поверхности, либо показатель цвета, причём звёзды ранних спектральных классов, высоких температур и голубого цвета оказываются в левой части диаграммы, а поздних спектральных классов, низких температур и красного цвета — в правой части.

Подавляющее большинство звёзд может быть отнесено к одному из основных классов: O, B, A, F, G, K, M. В таком порядке эти классы образуют непрерывную последовательность по уменьшению эффективной температуры звезды и по цвету — от голубых к красным.

Характеристики звезд основных классов			
Класс	Температура, К	Цвет	Показатель цвета
O	> 30 000	Голубой	-0,3
B	10 000—30 000	Бело-голубой	-0,2
A	7400—10 000	Белый	0
F	6000—7400	Жёлто-белый	+0,4
G	5000—6000	Жёлтый	+0,6
K	3800—5000	Оранжевый	+1,0
M	2500—3800	Красный	+1,5

Каждый из этих классов, в свою очередь, делится на подклассы от 0 до 9 в порядке уменьшения температуры. Обозначение подкласса ставится после обозначения класса.

У звёзд разных спектральных классов оказываются разными не только температуры и цвета, но и спектральные линии. Например, в спектрах звёзд.



Кроме основных спектральных классов существуют и другие для звёзд, которым не подходит описанная классификация:

- Коричневые карлики – L, T, Y. Занимают промежуточное положение между планетами и звездами, имеет массы в сотых массах Солнца. В их недрах не достаточная температура для протекания термоядерных реакций. класс L (температура около 1300–2000 К), класс T (700–1300 К) и класс Y (менее 600 К).
- Углеродные звезды – C
- Циркониевые звезды – S
- Звезды Вольфа-Райе – W

По вертикали откладывается абсолютная звёздная величина или светимость, причём яркие звёзды располагаются в верхней части диаграммы, а тусклые — в нижней.

На диаграмме Герцшпрунга — Рассела звёзды распределены не равномерно, а сосредоточены в основном в нескольких областях. Такое распределение отражает особенности формирования звезд и хода их эволюции: масса, химический состав и возраст звезды определяют её положение на диаграмме. Звезды образуют последовательности, называемые классами светимости. В каждом классе светимости есть определённая зависимость между цветом и светимостью.

Классы светимости обозначаются римскими цифрами. Ниже приведены основные классы светимости в порядке уменьшения светимости.

- I — сверхгиганты
- II — яркие гиганты
- III — гиганты
- IV — субгиганты
- V — звёзды главной последовательности
- VI — субкарлики
- VII — белые карлики
- VIII — ядра планетарных туманностей

Абсолютное большинство звёзд — около 90 %, находятся на главной последовательно, то есть, от звёзд спектрального класса О до звёзд класса М. Вне зависимости от размера, звёзды главной последовательности принято называть карликами. Но белые карлики и коричневые карлики не относятся к главной последовательности.

На главной последовательности находятся звёзды, сжигающие водород в своих ядрах — это самая длительная стадия эволюции, с чем и связано большое количество звезд в этой области, кроме того, за время нахождения на главной последовательности параметры звезды меняются мало. Положение звезды на ней в основном зависит от массы звезды, и, гораздо слабее — от возраста и химического состава. Чем больше масса звезды, тем больше её температура и светимость и тем выше она находится на главной последовательности. Нижняя часть главной последовательности значительно более населена, чем верхняя часть, поскольку более массивные звёзды формируются в меньшем количестве и быстрее эволюционируют, покидая главную последовательность.

Субкарлики образуют последовательность, которая проходит вдоль главной последовательности, в спектральных классах от А до М, но ниже. Как и звёзды главной последовательности, субкарлики сжигают водород в своих ядрах, но отличаются более низким содержанием тяжёлых элементов.

Гигантами называют звёзды крупных размеров, которые на диаграмме Герцшпрунга — Рассела находятся выше главной последовательности. Наиболее заметна ветвь гигантов в спектральных классах G, K, M. Гиганты спектральных классов K и M составляют подтип, известный как красные гиганты. Субгиганты — звёзды, которые на диаграмме Герцшпрунга — Рассела занимают промежуточную область между главной последовательностью и гигантами.

Звёзды попадают в область субгигантов, а затем — гигантов после того, как в ядре звезды заканчивается водород, ядро становится гелиевым, а ядерное горение водорода продолжается в слоевом источнике. Мощность энерговыделения увеличивается, а вместе с ней и светимость; внешние слои звезды расширяются, температура звезды при этом понижается. Более массивные звёзды могут становиться голубыми гигантами, когда уже сошли с главной последовательности и находятся на пути превращения в сверхгиганты — для них эта стадия эволюции аналогична стадии субгиганта для менее массивных звёзд.

Массивные звёзды становятся сверхгигантами после того, как в их недрах исчерпывается водород: сгорание водорода продолжается в слоевом источнике, а в ядре начинают идти ядерные реакции с участием всё более тяжёлых элементов. Внешние слои звезды расширяются и охлаждаются, и звезда, двигаясь вправо по диаграмме, становится сверхгигантом: сначала голубыми, затем красными.

Жизнь звезды заканчивается тогда, когда в её ядре иссякает запас топлива, данные объекты не представлены на диаграмме Герцшпрунга — Рассела. Дальнейшая судьба объекта определяется его массой:

1. Маломассивные и средние звёзды (до 8 солнечных масс): После того, как звезда на стадии красного гиганта исчерпывает вещество для ядерных реакций, она сбрасывает свои внешние оболочки. Из сброшенного вещества возникает планетарная туманность, в центре которой остаётся бывшее ядро звезды — оно становится белым карликом. Белые карлики.
2. Массивные звёзды (более 8 солнечных масс): звёзды продолжают сжигать более тяжёлые элементы до тех пор, пока в ядре не образуется железо, которое не может поддерживать термоядерные реакции, что приводит к гравитационному коллапсу и взрыву сверхновой. После этого остаётся: Чёрная дыра или Нейтронная звезда (Радиопульсар (Эжектор), Пропеллер, Рентгеновский пульсар (Аккректор))

2.2 Планетарные системы

Планетарные системы – система гравитационно связанных звезд и различных незвёздообразных объектов: планет и их спутников, карликовых планет и их спутников, астероидов, космической пыли, которые обращаются вокруг общего центра масс.

Долгое время задача обнаружения планет возле других звезд оставалась неразрешённой, так как планеты чрезвычайно малы и тусклы по сравнению со звёздами. Сейчас подавляющее большинство открытых экзопланет обнаружено с использованием различных методик:

1. Метод Доплера — измерение радиальной скорости звезды.
2. Транзитный метод — наблюдение уменьшения светимости звезды при прохождении планеты на её фоне.
3. Метод гравитационного микролинзирования - наблюдение изменения направления луча света под воздействием гравитации.
4. Астрометрический метод — наблюдение изменении собственного движения звезды под гравитационным воздействием планеты.
5. Радионаблюдение пульсаров — если вокруг пульсара вращаются планеты, то излучаемый пульсаром сигнал имеет осциллирующий характер.
6. Метод прямого наблюдения — получение прямых изображений планет посредством изолирования планет от света их звезды.

Проекты «Кеплер», «TESS», «Gaia» занимаются обнаружением экзопланет, по проекту «Кеплер» на август 2024 года число кандидатов — около 2000, а по проекту «TESS» на август 2024 года — более 4600, однако для получения ими статуса подтверждённых планет требуется их повторная регистрация с помощью наземных телескопов.

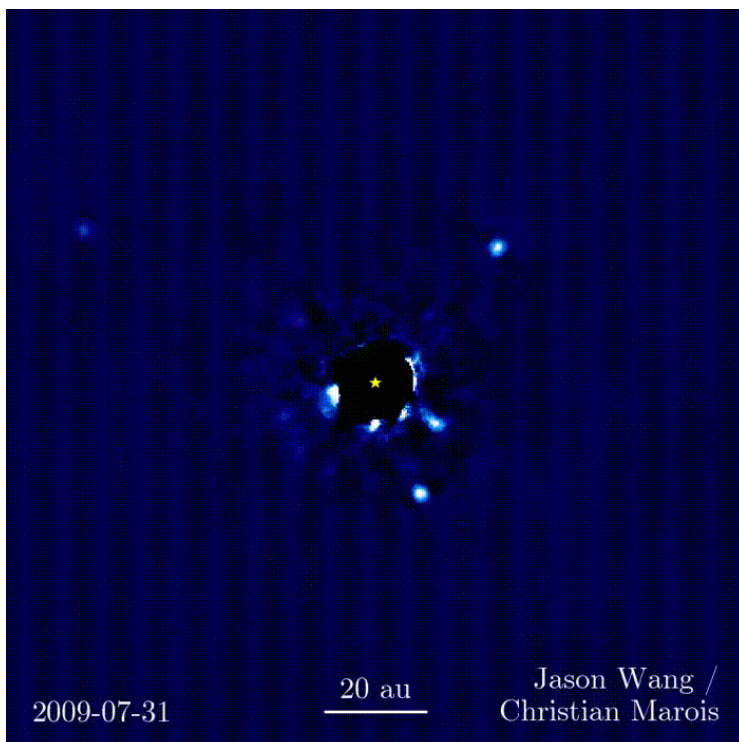
По состоянию на март 2025 известно 5849 подтверждённых экзопланет в 4367 планетных системах по информации, взятой с официального сайта NASA. Общее количество экзопланет в галактике Млечный Путь оценивается не менее чем в 100 миллиардов, из которых от 5 до 20 миллиардов, возможно, являются «землеподобными»; в октябре 2020 года ученые подсчитали общее число возможно обитаемых экзопланет в галактике Млечный путь, их число составляет около 300 миллионов.

2.3 Зона обитаемости

Зоной обитаемости называют условная область вокруг звезды, определённую из расчёта, что условия на поверхности находящихся в ней планет будут близки к условиям на поверхности Земли и будут обеспечивать существование воды в жидком состоянии, поскольку она является необходимым растворителем во многих биохимических реакциях. Соответственно, такие планеты будут благоприятны для возникновения жизни, похожей на земную. За внешней границей обитаемой зоны планета не получает достаточно радиации центрального светила, чтобы компенсировать потери на излучение, и её температура опустится ниже точки замерзания воды. Планета, расположенная ближе к светилу, чем внутренняя граница обитаемой зоны, будет чрезмерно нагреваться его излучением, в результате чего вода испарится.

Для солнечной системы существуют разные оценки того, на каком расстоянии от звезды находится обитаемая зона:

Внутренняя граница а, а.е.	Внешняя граница, а.е.	Источник	Примечание
0,725	1,24	Dole 1964	Оценка в предположении оптически прозрачной атмосферы и фиксированного альбеда
0,95	1,01	Hart et al. 1978, 1979	Звёзды K0 и дальше не могут иметь обитаемой зоны
0,95	3,0	Fogg 1992	Оценка с использованием углеродных циклов
0,95	1,37	Kasting et al. 1993	



Получить представление о траектории экзопланет можно по методу прямых наблюдений, как это было с системой HR-8799: при помощи 10 метрового телескопа в обсерватории Кека на Гавайях на протяжении 7 лет собирались снимки, которые после сформировали в видео, их удалось получить из-за благоприятного расположению плоскости системы по отношению к солнечной системе, удаленности планет от звезды, их большой массе, составляющей от 7 до 10 масс Юпитера, и типу звезды; или через моделирование планетарных систем по данным о объектах системы.

Такие проекты как PLANET, Обсерватория «Кеплер»,

Обсерватория «Чандра», Обсерватория «Кека» и многие другие заняты получением изображений космических объектов и явлений, в том числе и экзопланет.

3. Построение физической модели зоны обитаемости

Составим модель, в которой на зону обитаемости основное влияние оказывает количество излучения, приходящее от звезды на планету. Для этого в работе произведены расчеты радиусов областей с минимальным и максимальным излучением, пригодным для развития живых организмов для звезд в сравнении с Солнечной системой. Эти параметры выбраны так как наша планета пока единственная, где достоверно зарегистрировано наличие жизни.

Закон Стефана-Больцмана — интегральный закон излучения абсолютно черного тела. Он определяет зависимость плотности мощности излучения абсолютно черного тела от его температуры. В словесной форме его можно сформулировать следующим образом: полная объёмная плотность равновесного излучения и полная испускательная способность абсолютно чёрного тела пропорциональны четвёртой степени его температуры:

$$Re = \sigma T^4$$

где σ — постоянная Стефана-Больцмана.

Температуру звезд можно определить, рассматривая испускаемую энергию как излучение абсолютно чёрного тела. Светимость звезды:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

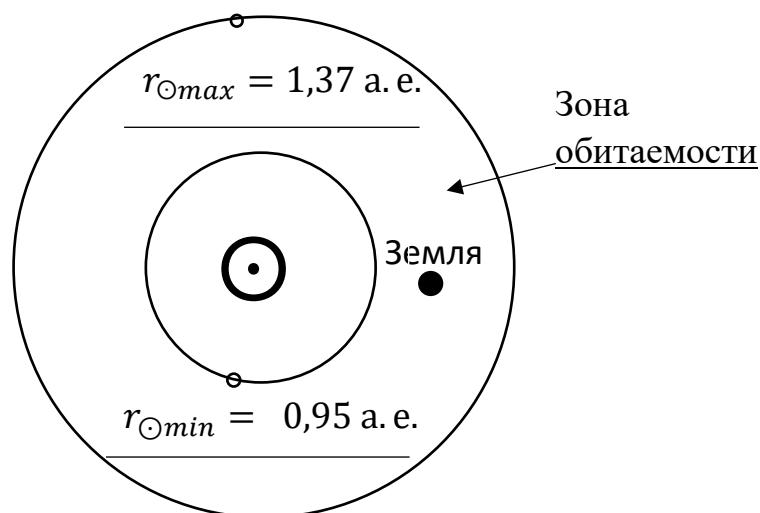
где R — радиус звезды, а T — ее температура.

Мощность, выходящая с 1 м² $Re = \frac{L}{S_{\text{поверхности звезды}}} = \sigma T^4$. Мощность, проходящая через 1 м² на расстоянии $a=1$ а.е. (радиус орбиты Земли) $k_0=1367$ Вт/м² называется солнечной постоянной, с ее помощью определяем полную светимость (мощность излучения) Солнца:

$$L_{\odot} = k_0 4\pi a^2 = 4 * 10^{26} \text{Вт}$$

Коэффициент k обратно пропорционален квадрату расстояния от звезды, поэтому $k(r) = \frac{k_0}{r^2}$, где r измеряется в а.е.

Так как только исследование 1993 года не имеет на данный момент примечаний, при которых не возмозможно существование жикой воды в этой области, то за внешнюю и внутреннюю границы будут приниматься значения из этого исследования.



С учетом того, что в зоне обитаемости другой звезды условия должны быть подобны зоне обитаемости в солнечной системе, то и количество получаемой энергии должно быть таким же.

$$\sigma T^4 \frac{R_{\odot}^2}{r_{\odot min}^2} = k_{\odot 1} = \sigma T_{звезды}^4 \frac{R_{звезды}^2}{r_{min}^2}$$

$$\sigma T^4 \frac{R_{\odot}^2}{r_{\odot max}^2} = k_{\odot 2} = \sigma T_{звезды}^4 \frac{R_{звезды}^2}{r_{max}^2}$$

Путем преобразований получаем значения радиусов ближней и дальней границы зоны обитаемости для звезды:

$$r_{min} = \left(\frac{T_{звезды}}{T_{\odot}} \right)^2 r_{\odot min} \frac{R_{звезды}}{R_{\odot}} \quad (1)$$

$$r_{max} = \left(\frac{T_{звезды}}{T_{\odot}} \right)^2 r_{\odot max} \frac{R_{звезды}}{R_{\odot}} \quad (2)$$

В Солнечной системе в зоне обитаемости находится Земля, у её границ – Венера и Марс.

Ввиду возможностей, существующих в рамках этой работы, будет рассмотрен именно метод моделирования движения экзопланет вокруг родительских звезд с определением зоны обитаемости.

Первый закон Кеплера гласит, что:

Орбита каждой планеты представляет собой эллипс, в одном из двух фокусов которого находится Солнце:

$$r = \frac{a}{1 + \varepsilon \cos \theta}$$

где a – большая полуось, ε – эксцентриситет, r – расстояние от звезды до планеты, θ – угол между текущим положением планеты и ее ближайшим подходом к Звезде.

При $\theta = 180^\circ$, планета достигает афелия - дальнейшей от звезды точке, большой полуоси a . При $\theta = 0^\circ$, планета достигает перигелия - ближайшей к звезде точке, малой полуоси b .

Путем преобразований можно получить следующее уравнение:

$$b = \frac{a}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}$$

Звезды за счет силы гравитации притягивают планеты и другие космические тела. При этом планеты движутся с высокой скоростью, и возникает центробежная сила, которая пытается отбросить планету от Звезды. В каждой точке орбиты сила притяжения Звезды компенсируется центробежной силой планеты, и она находится в зоне равновесия, не сходя с орбиты.

Так как, эллиптическая орбита может принимать различные формы относительно области зоны обитаемости, следует составить следующие уравнения, визуализацией которых станет понятно полностью ли орбита планеты находится в зоне обитаемости.

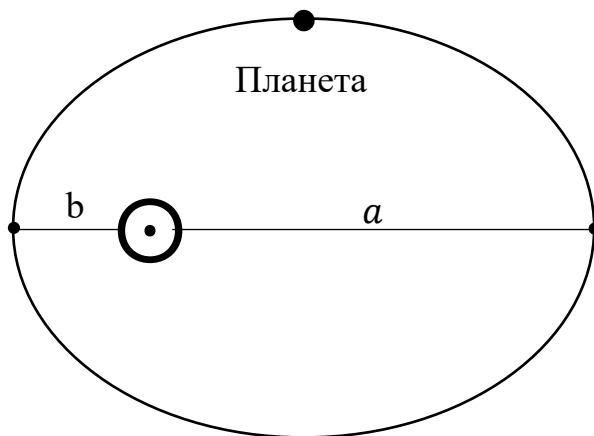
Уравнение скорости планеты, в случае ее движения по круговой орбите, принимает вид:

$$V_c = \frac{2\pi r}{T}$$

где T – период обращения планеты вокруг звезды, а $r = a$.

Путем преобразований можно получить следующие уравнения:

Скорость движения планеты в перигелии



$$V_b = V_c \sqrt{\frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon}} \quad (3)$$

Скорость движения планеты в афелии

$$V_a = V_c \sqrt{\frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon}} \quad (4)$$

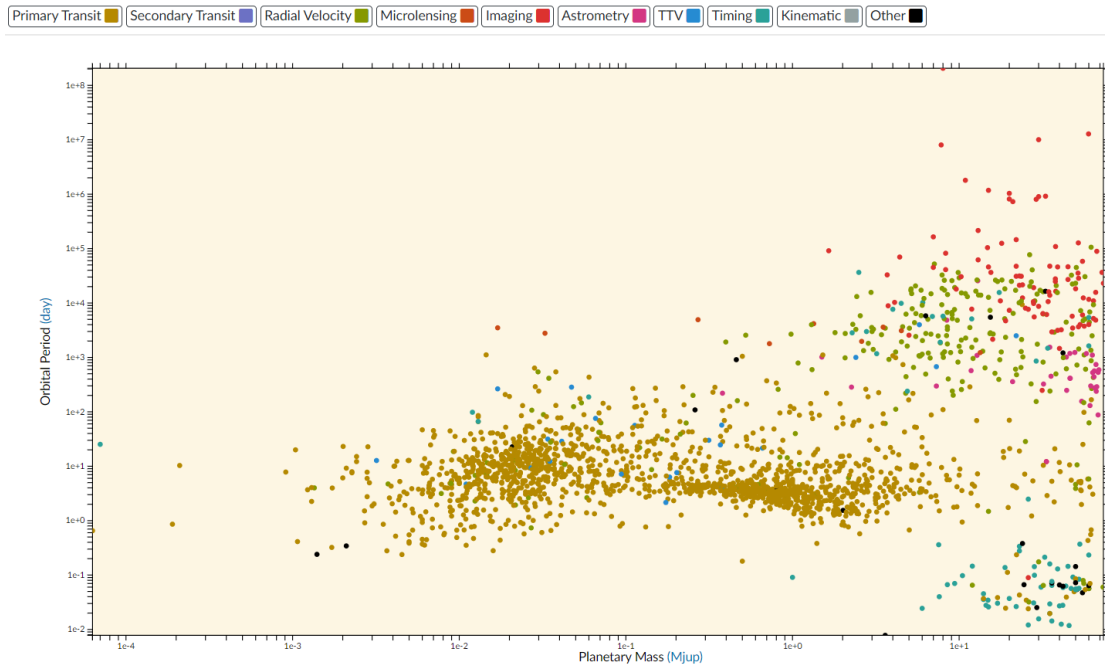
Звезды типа Y, T не могут рассматриваться в рамках данной работы, так как термоядерный синтез в них практически не протекает. Из этого следует, что данные звезды либо не могут доставлять нужное количество тепла в принципе, либо зоны обитаемости будут расположены слишком близко, из-за чего планеты будут находиться в приливном захвате, по этой причине планета всегда будет обращена к звезде одной стороной, которая будет излишне нагреваться, в то время, как вторая будет холодна. Нейтронные звезды также не рассматриваются в этой работе ввиду того, что они закончили “жизнь” на главной последовательности, следовательно, в процессе расширения могли временно поглотить планеты, которые сейчас расположены в

зоне обитаемости, и также из-за сильного магнитного поля, высокой скорости вращения, то есть всех характеристик пульсаров.

Исходя из вышперечисленного в рамках данной работы буду рассмотрены планетарные системы, в которых звезда O, A, B, C, D, F, G, K, M, L, SdB, W типа с определенной массой, планеты с известным периодом обращения, массой, радиусом звезды, хотя бы с одним из показателей: большая полуось, малая полуось, эксцентриситет. Будет применен метод модерирования для получения траекторий экзопланет, ввиду отсутствия оборудования для получения прямых изображений, не возможности получения прямых изображений для большинства систем, необходимой длительности наблюдения.

4. Построение компьютерной модели звездных систем

Для моделирования движения планет в поле тяжести звезды использовался УМК «Живая физика» 5.2. Рассматривалось движение планет в одной плоскости (для упрощения расчетов и т.к. в звездных системах орбиты планеты в основном находятся в плоскости, перпендикулярной оси вращения звезды). Данные о ближайших звездах с планетами взяты из каталога «Энциклопедия экзопланетных систем» exoplanet.eu В список найденных экзопланет включены 5666 объекта с информацией об их параметрах.



Некоторые системы необходимо исключить из рассмотрения:

Критерии	Количество	Остается для последующего анализа
Не определен спектральный класс звезды, следовательно - температура	400	5266
Не подходят по спектральному классу	56	5210
Отсутствует информация о расстоянии от планеты до звезды	1666	3544
Отсутствует информация о массе звезды	115	3429
Отсутствует информация о массе планеты	88	3341
Отсутствует информация о радиусе звезды	317	3024
Отсутствует информация о периоде обращения	23	3001

В дальнейшем будет рассмотрено 3001 планета.

Родительские звезды экзопланет, рассмотренных далее, имеют следующие спектральные классы:

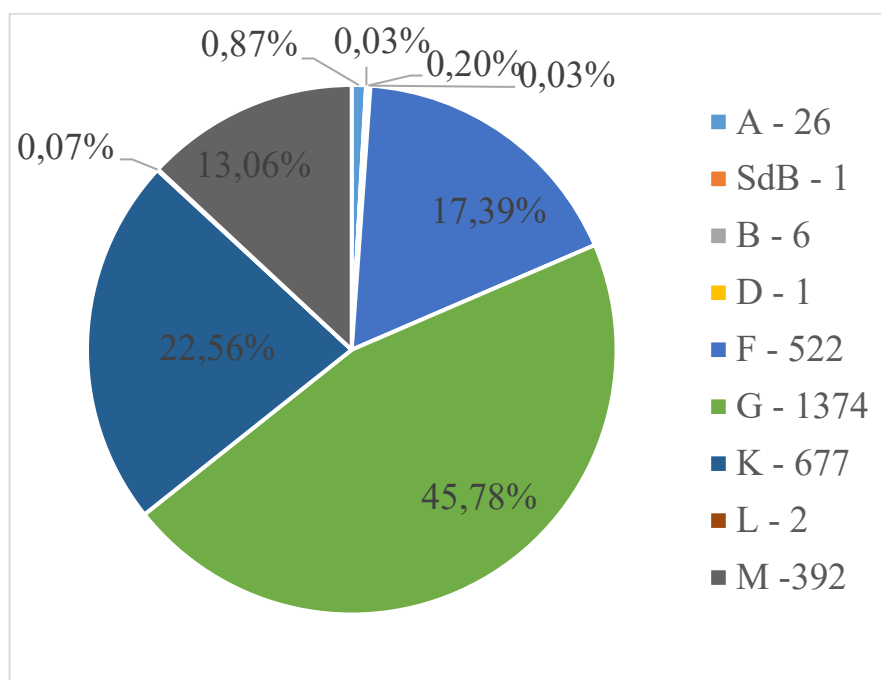


Рис. 1 Распределение систем по спектральным классам звезд

Данные об экзопланетах с характеристиками, включающими в себя данные нужные для расчетов, собраны в таблицу, по данным проводим расчеты:

Название	Масса (M _J)	Период обращения, день	Масса звезды (M _☉)	R звезды	Спектральный класс	T, K	a, а.е.	e	b, а.е.	Ближний край	Дальний край	V c, м/с	V b, м/с	Вхождение в зону обитаемости
11 Com b	16,1284	326,03	2,7	19	G8 III	4742	1,29	0,231	1,255	11,7794253	16,98717	43045	54461	Не входит
11 UMi b	11,0873	516,22	1,8	24,08	K4 III	4340	1,54	0,08	1,535	12,5049899	18,03351	32455	35164	Не входит
14 And b	4,684	185,84	2,2	11	K0 III	4813	0,83	0	0,83	7,02541221	10,13138	48588	48588	Не входит
14 Her b	0	1767,56	0,9	0,708	K0 V	5311	2,82	0,372	2,618	0,55059627	0,794018	17357	25655	Не входит
14 Her c	7,1	52160	0,9	0,708	K0 V	5311	27	0,65	20,52	0,55059627	0,794018	5631,4	12227	Не входит
16 Cyg B b	1,64	799,5	1,01	0,98	G2,5 V	5766	1,68	0,689	1,218	0,8983028	1,295447	22860	53274	Не входит
17 Sco b	4,32	578,38	1,22	25,92	K3 III	4157	1,45	0,06	1,447	12,3493031	17,80899	27274	28962	Не входит
18 Del b	10,3	993,3	2,3	8,5	G6 III	4979	2,6	0,08	2,592	5,80965818	8,378139	28476	30853	Не входит
1SWASP J1407 b	20	3725	0,9	0,99		4400	3,9		3,9	0,52843059	0,762053	11390	11390	Не входит
24 Boo b	0,91	30,3506	0,99	10,64	G3 IV	4893	0,19	0,042	0,19	7,02327158	10,1283	68105	71028	Не входит
24 Sex b	1,84	452,8	1,54	4,9	G5	5098	1,33	0,09	1,328	3,51109957	5,063375	32027	35052	Не входит
24 Sex c	1,52	883	1,54	4,9	G5	5098	2,08	0,29	1,991	3,51109957	5,063375	25627	34543	Не входит
2M 2140+16 b	20	7340	0,08	0,1		2300	3,53	0,26	3,409	0,01458489	0,021033	5232	6827,2	Не входит
2M 2206-20 b	30	8686	0,13	0,11		2350	4,48	0	4,48	0,0167485	0,024153	5611,1	5611,1	Не входит
3 Cnc b	20,76	853,64	2,94	39,38	K3 III	4319	2,52	0,04	2,518	20,2530075	29,20697	32116	33427	Не входит
38 Vir b	4,51	825,9	1,18	1,45	F6 V	6557	1,82	0,03	1,819	1,71880169	2,478693	23974	24704	Входит
44 Uma b	12,11	785,74	2,19	45,12	K3 III	4215	2,16	0,11	2,147	22,1009861	31,87195	29907	33399	Не входит
47 Uma b	2,53	1078	1,03	1,24	G0 V	5892	2,1	0,032	2,099	1,18684653	1,711558	21193	21882	Не входит
47 Uma c	0,54	2391	1,03	1,24	G0 V	5892	3,6	0,098	3,583	1,18684653	1,711558	16380	18072	Не входит
47 Uma d	1,64	14002	1,03	1,24	G0 V	5892	11,6	0,16	11,45	1,18684653	1,711558	9012,8	10591	Не входит

На основе полученных данных составляются модели.

Реальные размеры объектов не соблюдены в угоду визуализации системы, изменение размеров объектов, в сумме с остальными неизменными параметрами, не влияет на точность моделирования. Крупный объект в центре оранжевого цвета – звезда. Красная толстая линия, представляющая собой окружность, - ближний край зоны обитаемости.

Голубая толстая линия, представляющая собой окружность, - дальний край зоны обитаемости. Пример результатов вычислений представлен на рисунке.

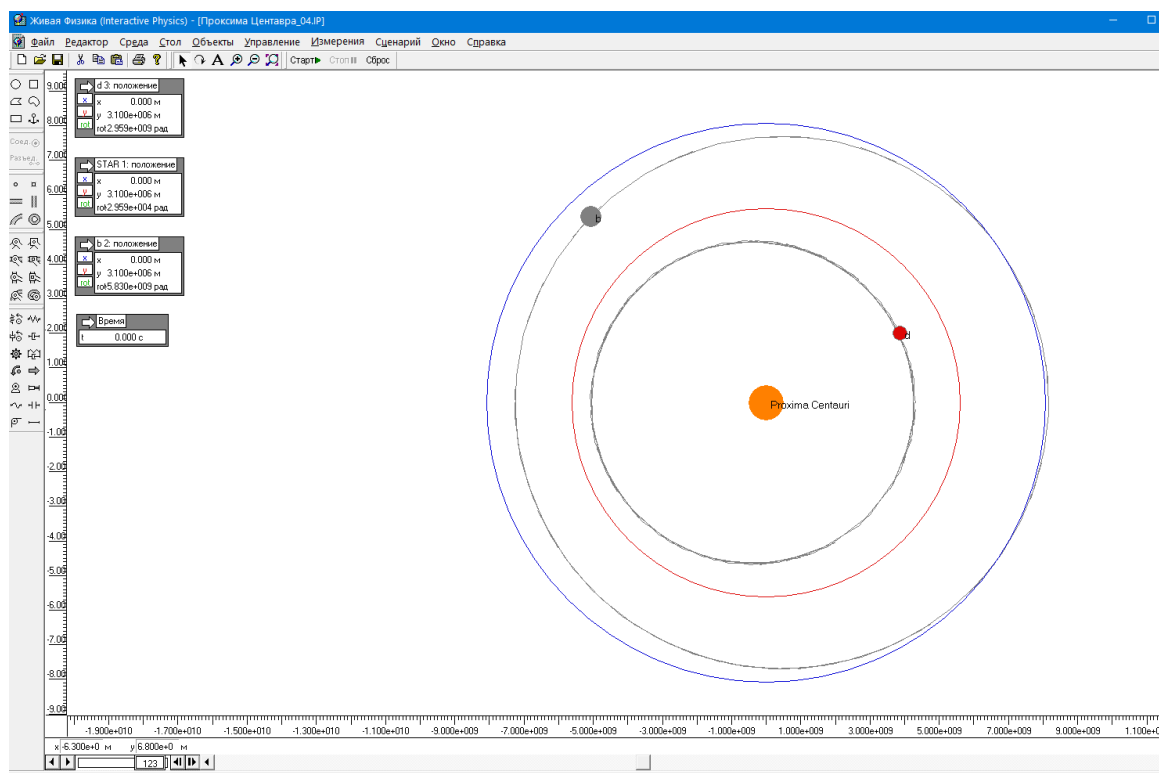


Рис. 2 Пример результатов моделирования движения планеты вокруг звезды Proxima Centauri

Результаты расчетов позволяют визуализировать траектории планет и их попадание в зону обитаемости для данной звезды. Границы для каждой звезды рассчитываются по формулам (1), (2).

В качестве примера, приведем часть Солнечной системы.

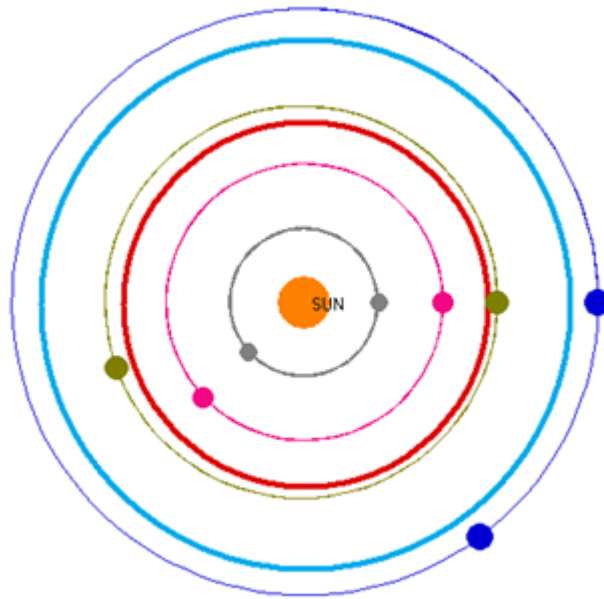


Рис.3 Модель Солнечной системы в программе «Живая физика».

На рисунке серый круг – Меркурий, серый эллипс – его траектория, розовый круг – Венера, розовый эллипс – ее траектория, зеленый круг – Земля, зеленый эллипс – ее траектория, синий круг – Марс, синий эллипс – его траектория.

По данной модели мы видим, что Земля находится в зоне обитаемости, в отличие от Марса и Венеры, остальных планет. Земля является единственной планетой в Солнечной системе, где на данный момент обнаружена жизнь.

Далее будут приведены некоторые составленные модели.

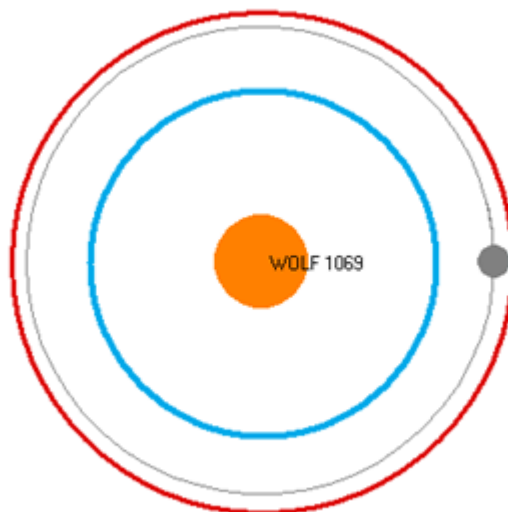


Рис.4 Система Wolf 1069

В системе Wolf 1069 обнаружена одна планета, которая находится в зоне обитаемости.

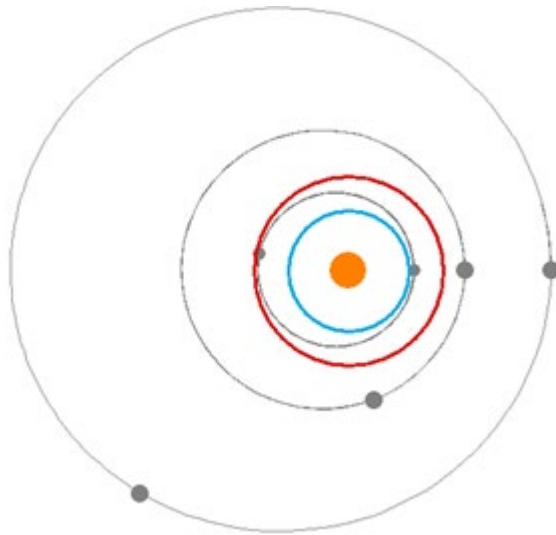


Рис. 5 Система Teegarden`s

В системе Teegarden`s обнаружено 3 экзопланеты, одна из которых расположена в зоне обитаемости, а две другие полностью за внешним краем зоны обитаемости.

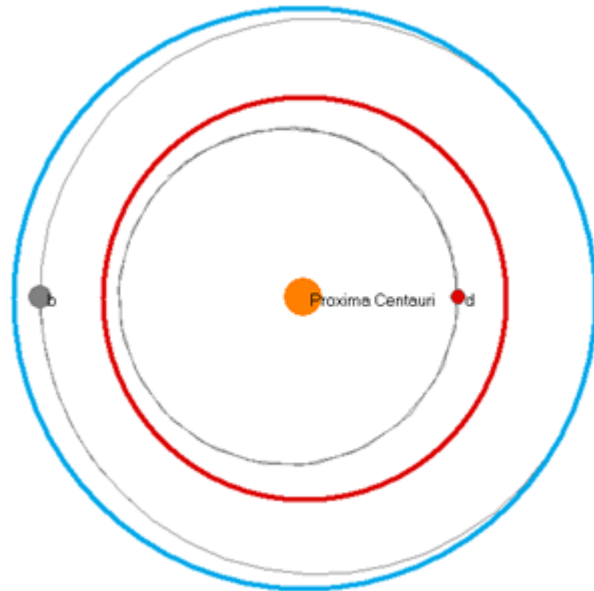


Рис. 6 Система Proxima Centauri

В системе Proxima Centauri обнаружено 2 экзопланеты, одна из которых находится в зоне обитаемости. Вторая движется вблизи дальнего края зоны обитаемости, иногда выходя за его пределы.

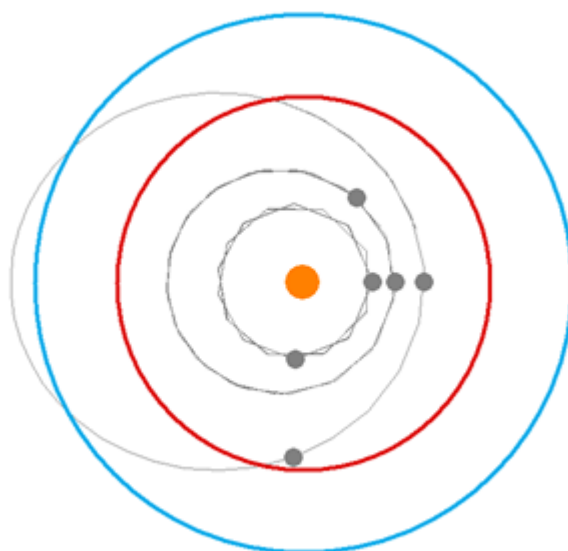
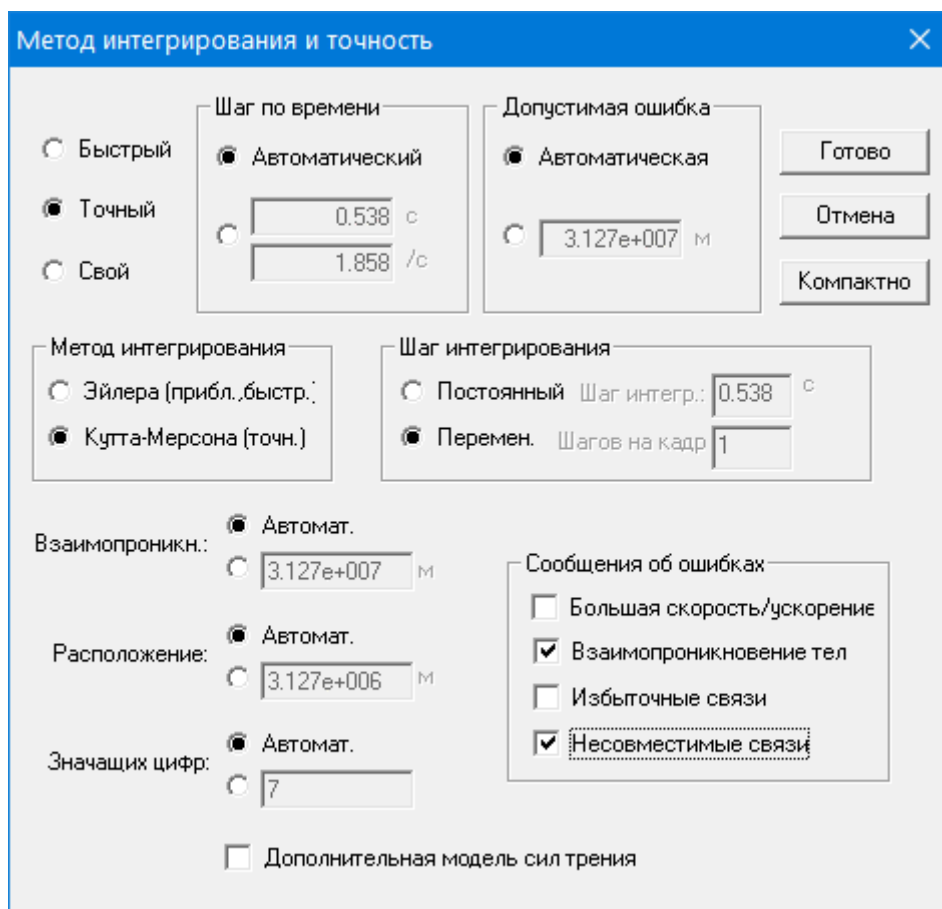
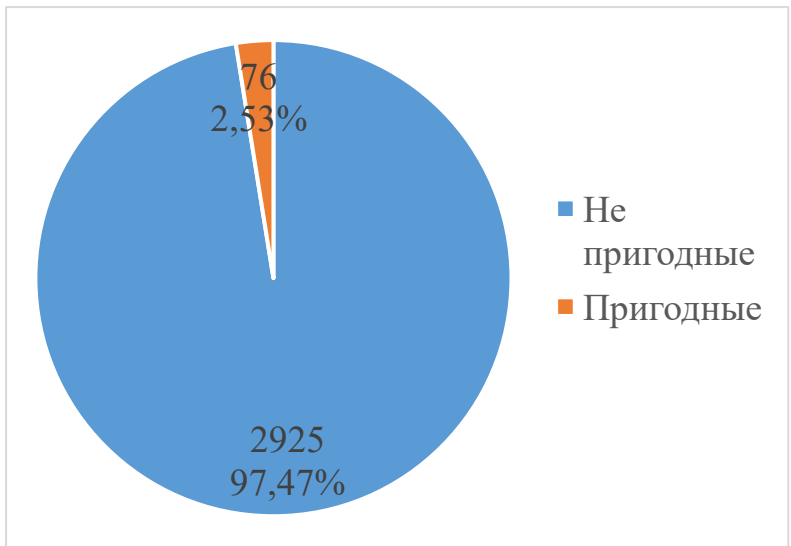


Рис. 7 Система YZ Cet

В системе YZ Cet обнаружено 3 экзопланеты, две планеты из которых полностью вращаются слишком близко в звезде, а у одной - часть траектории в зоне обитаемости и часть орбиты – внутри и снаружи рассчитанной области.

Неровности траектории на рисунке обусловлены погрешностями, возникающими в результате работы программы. Настройки точности расчетов приведены на рисунке:



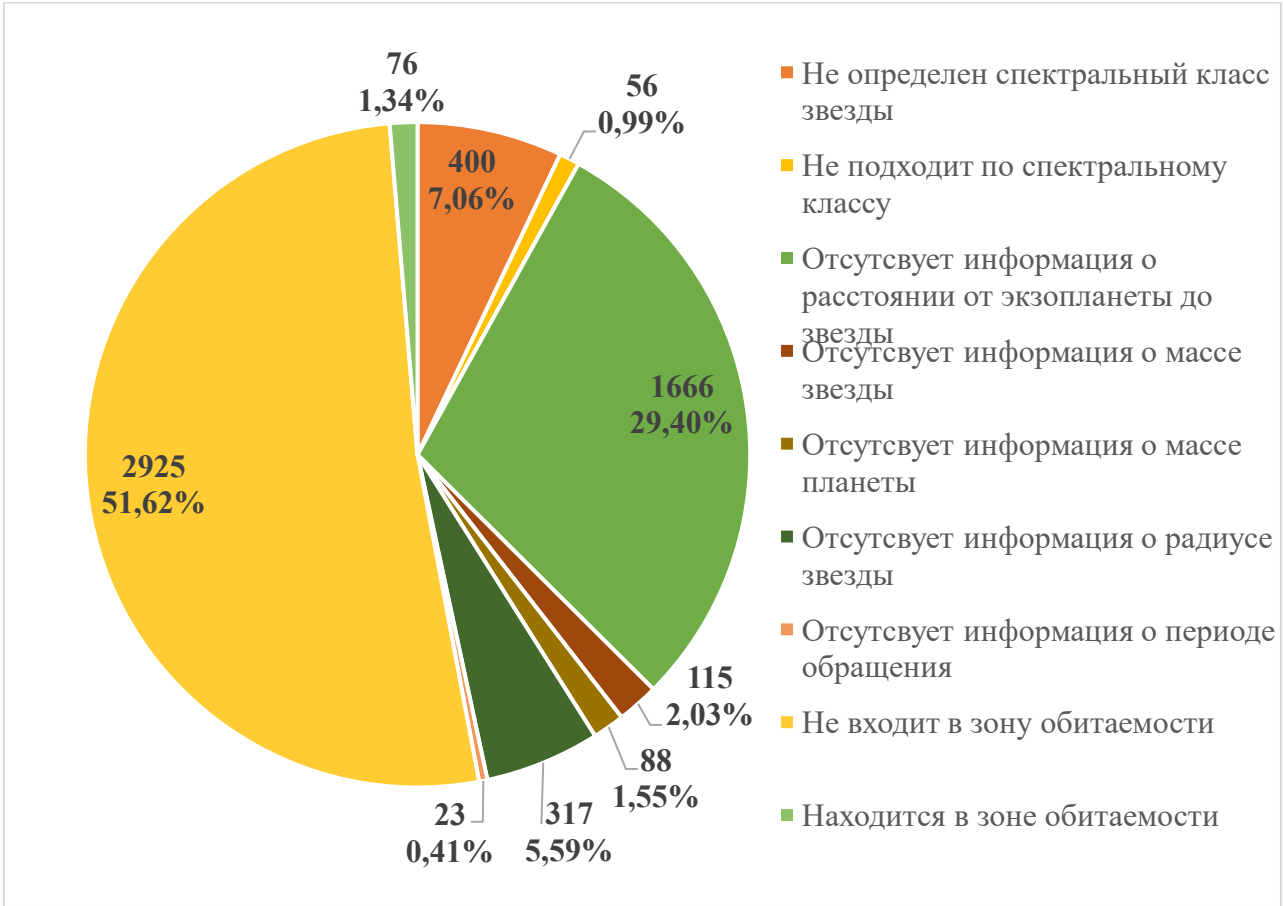


Определив, полностью ли входит экзопланета в предполагаемую зону обитаемости, мы можем сказать, что эта планета удовлетворяет нашему исследованию.

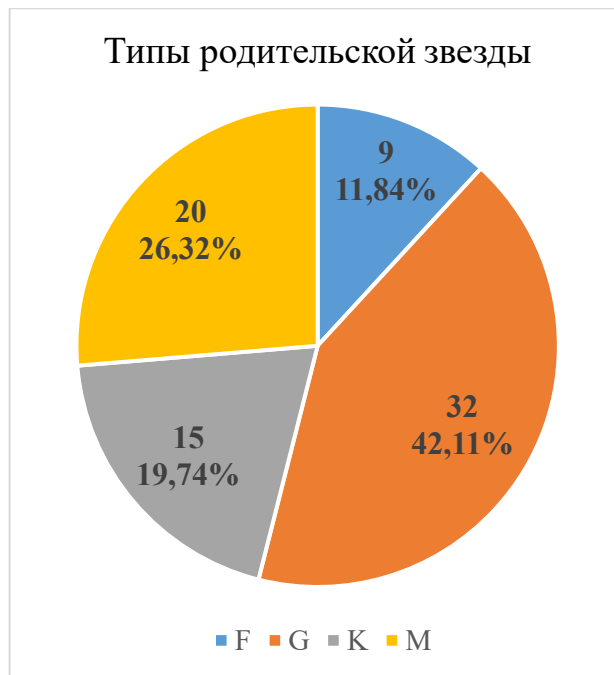
Полный список потенциально пригодных для обитания экзопланет приведен в Приложении А.

От общего числа обнаруженных на данный момент

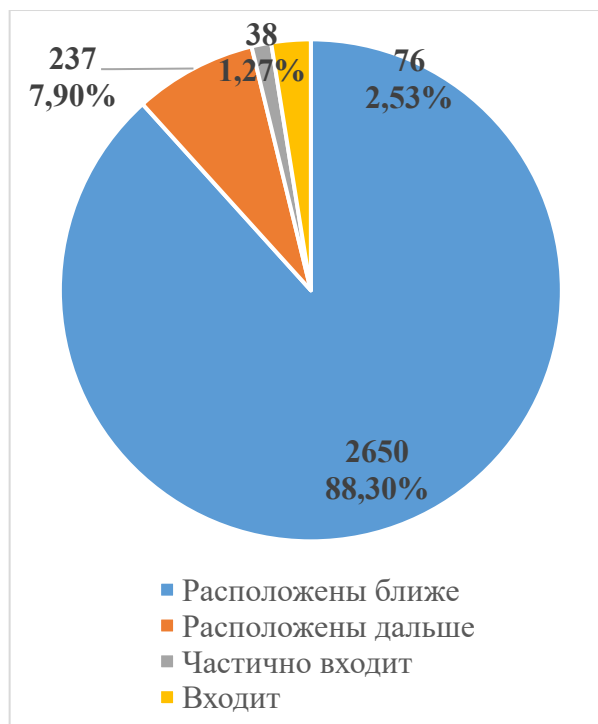
экзопланет это составляет:



Среди обнаруженных потенциально пригодных экзопланет:



Положение экзопланет относительно зоны обитаемости:



Заключение

По полученным результатам можно сказать, что меньшая часть обнаруженных экзопланет пригодна для обитания (1,34% от общей численности и 2,53% от планет среди которых проводилось исследование), что подтверждает мою гипотезу.

Некоторое количество экзопланет, среди которых проводилось исследование, частично находится в зоне обитаемости, то есть во время обращения по своей орбите, некоторую часть времени проводит в зоне обитаемости (примерно 1,27 %), большая часть экзопланет находится ближе зоны обитаемости (примерно 88,3%), меньшая же часть находится за ее пределами (примерно 7,9 %).

Все предположительно пригодные экзопланеты расположен у звезд главной последовательности, что может быть связано с большим количеством звезд данного типа в исходных данных (примерно 98,8%).

Большая часть пригодных экзопланет обнаружено у звезд G типа (42% от планет пригодных для обитания, это может быть связано с общей распространённостью звезд главной последовательности и большим количеством звезд данного типа в начале исследования, примерно 45,78%).

Сравнив полученные мной результаты с уже имеющимися, можно сказать, что часть экзопланет совпадает с результатами других работ, а часть нет (полученные мной результаты не входят в уже существующие и наоборот).

Данные расхождения могли получиться из-за разных данных, использованных для расчетов, погрешностей и неточностей, отсутствия полной информации о предмете исследования. Также, рассмотрев как единственный показатель, влияющий на температуру на поверхности экзопланеты, удаленность от звезды, вокруг которой вращается экзопланета, и ее светимость, мы опустили, возможное влияние других звезд (в кратных системах) и многие другие факторы, которые включают в себя наличие магнитного поля, атмосферы.

К тому же стоит упомянуть, что концепция зоны обитаемости критикуется. Два основных возражения заключаются в том, что предполагается, что внеземной жизни нужны те же условия, что и нам, а с другой — упускается из виду то обстоятельство, что близость к светилу — не единственный возможный способ создания достаточной температуры на поверхности.

Итоги данной работы могут быть использованы для последующих, более точных, исследований в этой области. Можно рассмотреть массы экзопланет, чтобы (со многими допущениями) понять, возможно ли удержание атмосферы; в условиях поиска места, пригодного для обитания видов, подобных нашему, стоит рассмотреть тип планеты (является ли планета представителем земной группы); в двойных и кратных системах — рассмотреть влияние других звезд на температуру на поверхностях экзопланет, что поможет дать представление о температуре на поверхности экзопланеты; проверить не находится ли планета в приливном захвате, из-за чего всегда будет обращена одной стороной к звезде; в условии наличия атмосферы — рассмотреть наличие биомаркеров, биосигнатур.

Список используемой литературы

1. Афанасьева В.И. Зоны обитаемости. От солнечной системы к экзопланетам. // Земля и Вселенная. - 2020. - №3. - С. 37-45
2. Юшин Д. Что такое "зона обитаемости звезды"? // Интернет ресурс Science & Future. - URL: <https://dzen.ru/a/WWhXs45VfWpCjTLD> (дата обращения 16.01.2025)
3. Чаругин В. М. Астрономия. 10-11 классы : учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / В.М. Чаругин. - М. : Просвещение, 2018. - 144 с.
4. Энциклопедия экзопланетных систем [Электронный ресурс]. – URL: <https://exoplanet.eu/> (дата обращения 26.10.2024)
5. Официальный сайт NASA - URL: <https://www.nasa.gov/>
6. Сайт WikipediA - URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Methods_of_detecting_exoplanets (дата обращения 31.03.25)
7. Сайт WikipediA – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Спектральная_классификация_звезд (обращение к версии 03.11.24)
8. Сайт SpaceGide.com – URL: <https://spacegid.com/spektralnyie-klassyi-zvezd.html> (обращение к версии 11.12.15)
9. M. G. Hidas, M. C. B. Ashley, J. K. Webb, M. Irwin, A. Phillips, H. Toyozumi, A. Deras, J. L. Christiansen, C. Nutto, S. Crothers. The University of New South Wales Extrasolar Planet Search: methods and first results from a field centred on NGC 6633 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 06.2025, С. 703 – 717 // URL: <https://academic.oup.com/mnras/article/360/2/703/967182?login=false>
10. David Charbonneau, Timothy M. Brown, Adam Burrows, Greg Laughlin. When Extrasolar Planets Transit Their Parent Stars// Cornell University 14.03.2006 // URL: <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0603376>
11. Сайт: Internet Archrive waybackmachine – URL: <https://web.archive.org/web/20051118033324/http://kepler.nasa.gov/about/>
12. Сайт: NASA Exoplanet Archive A Service of Nasa Exoplanet Science Institute - URL: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
13. Тутукова А.В. Звёзды / Большая российская энциклопедия / URL: <https://bigenc.ru/c/zvioletdy-ed73d6> (последняя дата обновления 19.10.22)

Приложение

Список потенциально пригодных для обитания экзопланет

1. 38 Vir b	28. HD 23596 b	55. Kepler-452 b
2. 55 Cnc f	29. HD 27969 b	56. Kepler-454 c
3. 7 CMa b	30. HD 28185 b	57. Kepler-47 (AB) c
4. GJ 1061 d	31. HD 283869 b	58. Kepler-68 d
5. GJ 3293 b	32. HD 34445 f	59. KIC 10255705 b
6. GJ 687 b	33. HD 4732 A c	60. KIC 5010054 b
7. GJ 876 c	34. HD 564 b	61. KIC 5094412 b
8. HD 10697 b	35. HD 82943 b	62. KIC 6372194 b
9. HD 108874 b	36. HD 86264 b	63. KOI-4878 b
10. HD 109286 b	37. HD 94834 b	64. LP 890-9 c
11. HD 125612 b	38. HIP 56640 b	65. LTT 1445A d
12. HD 137388 b	39. HIP 67851 c	66. mu Ara b
13. HD 142 A b	40. K2-18 b	67. Proxima Centauri b
14. HD 145934 b	41. K2-72 e	68. Teegarden's b
15. HD 147379 b	42. KELT-6 c	69. TOI-199 c
16. HD 154391 b	43. Kepler-1647 (AB) b	70. TOI-2257 b
17. HD 159868 b	44. Kepler-1652 b	71. TOI-700 d
18. HD 17674 b	45. Kepler-1653 b	72. TOI-715 b
19. HD 18015 b	46. Kepler-1690 b	73. TRAPPIST-1 d
20. HD 183263 b	47. Kepler-1708 b	74. TRAPPIST-1 e
21. HD 188015 b	48. Kepler-22 b	75. WASP-41 c
22. HD 191939 g	49. Kepler-26 e	76. Wolf 1069 b
23. HD 196885 A b	50. Kepler-283 c	
24. HD 210277 b	51. Kepler-296 f	
25. HD 213240 b	52. Kepler-34 (AB) b	
26. HD 216435 b	53. Kepler-442 b	
27. HD 218566 b	54. Kepler-443 b	