

На правах рукописи

Ананьева Владислава Игоревна

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКЗОПЛАНЕТ ПО МАССАМ И ОРБИТАЛЬНЫМ ПЕРИОДАМ
С УЧЕТОМ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИИ**

Специальность 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва – 2022

Работа выполнена в
Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт Космических Исследований Российской Академии Наук (ИКИ РАН)

Научный руководитель доктор технических наук,
Тавров Александр Викторович,
ведущий научный сотрудник ИКИ РАН,
зав. лаб. № 501

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Иванов Борис Александрович,
ведущий научный сотрудник Института динамики
геосфер РАН, Москва;
доктор физико-математических наук,
Токовинин Андрей Аврельевич, астроном
Межамериканской обсерватории Серро-Тололо,
Ла-Серена (Чили),

Ведущая организация: ФГБУН Физико-технический институт
имени А. Ф. Иоффе РАН.

Защита состоится « 11 » октября 2022 г. в ____ часов 00 минут в Конференц-зале
ИКИ РАН на заседании диссертационного совета Д 002.113.04 по адресу:
117997, Москва, ул. Профсоюзная 84/32.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,
просим направлять по адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная 84/32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН
и на сайте: http://iki.rssi.ru/diss/2022/ananyeva_diss.pdf

Автореферат разослан « _____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

к.ф.-м.н.

Ткаченко А.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Изучение внесолнечных планет (экзопланет) играет важную роль в сравнительной планетологии, что необходимо для понимания строения и эволюции Солнечной системы. Внесолнечные планетные системы демонстрируют большее разнообразие и содержат планеты, в том числе и не имеющие аналогов в Солнечной системе. Исследование статистических закономерностей экзопланет верифицирует теории планетообразования, показывает распространенность планет определенных типов в Галактике (в частности, планет земного типа в обитаемой зоне), указывает на значимые физические процессы при формировании и эволюции планетных систем.

В ряду статистических исследований изучение распределений внесолнечных планет по массам и по орбитальным периодам позволяет выявить преимущественную (усредненную) структуру планетных систем. Однако каталогизированные распределения (формируемые непосредственно из Экзопланетного архива НАСА [1], Энциклопедии внесолнечных планет [2], и др.), значительно искажены наблюдательной селекцией и, следовательно, статистически недостоверны. Требуется учет эффектов наблюдательной селекции и их коррекция для восстановления истинных статистических распределений экзопланет, в частности, по массам и орбитальным периодам. Сравнение истинных (восстановленных) распределений с предсказаниями космогонических теорий, в частности, космогонической теории популяционного синтеза (Мордасини [3]), позволяет провести проверку полученных результатов.

В последние годы продолжается бурное развитие наземных и космических наблюдательных программ и инструментов, посвященных как поискам, так и детальному изучению экзопланет. В декабре 2021 года был произведен запуск космического инфракрасного телескопа им. Джеймса Уэбба (JWST) [4], на 2025 год запланирован запуск российского ультрафиолетового телескопа «Спектр-УФ» (WSO-UV) [5]. В 2026 году планируется запуск миссии ЕКА PLATO [6],

посвященной широкомасштабным поискам экзопланет транзитным методом, в 2028 году – запуск инфракрасного телескопа ARIEL [7], посвященного изучению экзопланетных атмосфер. Также на середину 2020-х годов запланирован запуск шестой «великой» обсерватории НАСА имени Нэнси Роман (WFIRST) [8], снабженной коронографом для прямого наблюдения экзопланет.

В настоящий момент количество известных экзопланет превысило 5 тысяч, свыше 95% из них открыто методом измерения лучевых скоростей родительских звезд и фотометрией транзитов. В настоящей работе детально исследованы статистические распределения по массам и по орбитальным периодам экзопланет, обнаруженных этими двумя методами.

Цели задачи работы

Основной целью настоящей диссертационной работы является исследование распределений по массам и по орбитальным периодам экзопланет, обнаруженных методом измерения лучевых скоростей родительских звезд (RV-планет) и методом фотометрии транзитов. Эту цель следует разделить на несколько пунктов:

1. Построение и анализ скорректированного с учетом наблюдательной селекции распределения по минимальным (проективным) массам планет, обнаруженных методом лучевых скоростей;
2. Построение и исследование скорректированного с учетом наблюдательной селекции распределения по орбитальным периодам планет, обнаруженных методом лучевых скоростей;
3. Построение и анализ скорректированного с учетом наблюдательной селекции распределения по массам транзитных планет;
4. Сравнение скорректированных распределений RV-планет и транзитных планет между собой по массам, а также с распределениями согласно выводам космогонических теорий (популяционного синтеза).

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Разработан матричный метод «окна видимости», определяющий

вероятности обнаружения планеты на диаграмме проективная масса – орбитальный период несколькими наблюдательными программами с различными точностями спектрографа, уровнями шума и продолжительностями наблюдений и т. п. для учета эффектов наблюдательной селекции для коррекции статистических распределений по массам и по орбитальным периодам планет, открытых методом лучевых скоростей.

2. Реализован алгоритм (вычислительный код в среде MatLab[®]) для определения вероятности обнаружения RV-планет в зависимости от их минимальных масс и орбитальных периодов;

3. Разработан метод учета разной доли транзитных планет с измеренной массой в зависимости от радиуса планет («коэффициент измеренности массы») для коррекции статистических распределений по массам планет, открытых транзитным методом;

4. Реализован алгоритм (вычислительный код в среде MatLab[®]) учета разной вероятности транзитной конфигурации и разной доли транзитных планет с измеренной массой в зависимости от радиуса планет.

Научная новизна работы

Все результаты диссертационной работы, представленные к защите, являются новыми.

Впервые было восстановлено и проанализировано скорректированное с учетом наблюдательной селекции статистическое распределение по массам транзитных экзопланет, для которых известно наклонение орбиты к лучу зрения и их истинная масса. Впервые показано, что распределение по массам транзитных экзопланет статистически достоверно зависит от геометрической вероятности транзитной конфигурации, а, следовательно, от расстояния между планетой и звездой, что свидетельствует о наличии преимущественной (усредненной) структуре планетных систем.

Впервые реализован метод учета разной эффективности различных наблюдательных программ обнаружения экзопланет, открытых методом лучевых скоростей, который был применен ко всему массиву данных о RV-планетах. Было

показано, что характер распределения RV-планет по массам зависит от орбитальных периодов, что также подтверждает наличие преимущественной (усредненной) структуры планетных систем.

Научная новизна исследования, определяется оригинальностью результатов и разработанных кодов. В случаях заимствования методов использование последних приводит к получению ранее не публиковавшихся результатов. Воспроизведение отдельных решений, не характеризующихся теоретической новизной, комментируется со ссылками на источники.

Научная и практическая значимость работы

Проведенные статистические исследования дают новую информацию об усредненном строении планетных систем у других звезд и находятся в хорошем согласии с космогонической теорией популяционного синтеза [3, 9]. Полученные распределения могут быть использованы для оценок распространенности планет различных типов в Галактике.

Вместе с тем, ряд обнаруженных особенностей статистических распределений отличается от теоретически предсказанных [3, 9] и указывает на значимые физические процессы в эволюции планетных систем. В частности, выявленная особенность (максимум) на распределении планет-гигантов, возможно, указывает на диапазон масс, где формирование планет происходит, в том числе, путем гравитационной неустойчивости в протопланетном диске, а другая особенность – минимум в области ~ 0.1 масс Юпитера в распределении по массам планет с короткими орбитальными периодами – известна как «пустыня горячих непунов».

Методология и методы исследования

Для восстановления скорректированных статистических распределений экзопланет по массам и по орбитальным периодам с учетом эффектов наблюдательной селекции были использованы оригинальные методы «коэффициент измеренности массы» и «окно видимости», а также метод учета геометрической вероятности транзитной конфигурации, представленный в [10]. При аппроксимации полученных распределений степенной функцией для

определения показателя степени использовался стандартный метод наименьших квадратов и метод определения погрешности параметра линейной регрессии. Все расчеты были реализованы в виде комплексов вычислительных кодов в среде MatLab®.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Эффекты наблюдательной селекции в распределении по массам транзитных экзопланет существенно корректируются с помощью: коэффициента измеренности массы, учета вероятности транзитной конфигурации и исключения транзитных планет, массы которых измерены TTV методом. Коэффициент измеренности массы учитывает разную долю планет с измеренной массой в зависимости от радиуса транзитной планеты. Исключение транзитных планет, массы которых измерены TTV методом, позволяет избежать влияния на статистику недостоверных и нефизичных номинальных масс.

2. Эффекты наблюдательной селекции распределения по массам и орбитальным периодам планет, обнаруженных методом лучевых скоростей, корректируются с помощью учета вероятности обнаружения планеты с данными минимальной массой и орбитальным периодом. Вычисленная матрица («окно видимости») определяет вероятности обнаружения планеты на диаграмме минимальная масса – орбитальный период и учитывает совокупную возможность детектирования планеты несколькими наблюдательными программами с различными точностями спектрографа, уровнями шума и продолжительностями наблюдений. Скорректированные распределения планет по массам и по орбитальным периодам находят делением на величину вероятности.

3. Скорректированные распределения RV-экзопланет по массам аппроксимируются кусочным степенным законом: в области 0.011-0.087 масс Юпитера (m_J) $dN/dm \propto m^{-3}$, в области 0.21-2.2 m_J $dN/dm \propto m^{-0.8\dots-1}$, в области 2.2-13 m_J $dN/dm \propto m^{-1.7\dots-2}$. В области 0.087-0.21 m_J наблюдается минимум, соответствующий т.н. «пустыне горячих нептун».

4. Скорректированные распределения по минимальным массам транзитных и RV-экзопланет согласуются друг с другом и с теоретическими предсказаниями космогонических теорий популяционного синтеза.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов основана на:

1. Публикациях в высокорейтинговых международных рецензируемых научных журналах *Icarus* и *MNRAS*, входящих в список ВАК, а также их публикации в российских рецензируемых научных журналах «Письма в *Астрономический Журнал*» и «*Астрономический Вестник*»;

2. Представлении на научных семинарах и международных научных конференциях;

3. Сравнении с результатами, полученными другими авторами;

4. Сравнении с предсказаниями космогонических моделей планетообразования.

Всего по теме диссертации опубликовано 7 публикаций в рецензируемых изданиях и сделано 8 докладов на конференциях, перечень которых приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Все работы из списка публикаций по теме диссертации выполнены в соавторстве. В основных результатах диссертации и выносимых на защиту положениях автору принадлежит ключевая роль, а именно: разработка методов учета наблюдательной селекции при анализе статистических распределений транзитных планет и планет, обнаруженных методом лучевых скоростей, поиск и отбор архивных данных, необходимых для коррекции статистических распределений, написание и отладка вычислительных кодов в среде *MatLab*[®], интерпретация полученных результатов, их оформление и представление.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 106 страниц машинописного текста, включая 36 рисунков, 4 таблицы, 91 наименование списка литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** показана актуальность проведенного исследования, посвященного изучению статистических распределений внесолнечных планет (экзопланет), что важно для развития сравнительной планетологии и лучшего понимания строения и эволюции Солнечной системы. Исследование статистических закономерностей экзопланет верифицирует космогонические теории планетообразования, показывает распространенность планет определенных типов в Галактике (например, планет земного типа в обитаемой зоне), указывает на значимые физические процессы при формировании и эволюции планетных систем, выявляет преимущественную (усредненную) структуру планетных систем.

Развитие предложенных методов перспективно для анализа наблюдательных данных с уже существующих и будущих наземных и космических обсерваторий.

Глава 1 посвящена анализу опубликованных к настоящему времени работ, посвященных усилиям учесть разнообразные эффекты наблюдательной селекции при исследовании распределений экзопланет по массам.

Количество открытых экзопланет (свыше 5 тысяч) позволяет проводить различные статистические исследования, но при анализе статистических закономерностей обязательно следует учитывать наблюдательную селекцию. Не учет наблюдательной селекции приводит к существенному искажению реальных распределений и недостоверным выводам. Факторы наблюдательной селекции различаются как для разных методов поиска экзопланет, так и для разных инструментов и наблюдательных программ, ведущих поиски в рамках одного метода.

К настоящему моменту не найдены опубликованные работы, где предлагались бы методы учета основных факторов наблюдательной селекции для транзитных планет и планет, открытых методом лучевых скоростей, применимые к произвольной выборке звезд, в том числе, позволяющие охватить планеты у звезд главной последовательности спектральных классов FGK, представляющие наибольший интерес.

В **Главе 2** исследуются распределения по минимальным (проективным) массам и орбитальным периодам экзопланет, открытых методом лучевых скоростей (RV-планет). В частности, показаны ограничения метода лучевых скоростей, обусловленные недостаточной точностью спектрографов, разным уровнем активности родительских звезд и ограниченным временем наблюдений. Предложен метод коррекции наблюдательной селекции («окно видимости»), который вычисляет вероятность обнаружения RV-планеты с данными массой и орбитальным периодом совокупностью наблюдательных программ на различных спектрографах. Изучены скорректированные таким образом статистические распределения RV-планет по минимальным массам и орбитальным периодам. Показано, что скорректированное распределение RV-планет по минимальным массам в целом следует кусочному степенному закону с изломами при 0.14 и 1.7 масс Юпитера, причем в области 0.02-0.087 масс Юпитера показатель степени равен -2.5...-3, в области 0.21-1.7 масс Юпитера – -0.8...1.0, в области 1.7-13 масс Юпитера – -1.7...-2.0 (Рис. 1). В области 0.087-0.21 масс Юпитера наблюдается характерный минимум, обусловленный дефицитом планет на тесных орбитах (с орбитальными периодами меньше 10 суток), называемым в публикациях «пустыней горячих нептун».

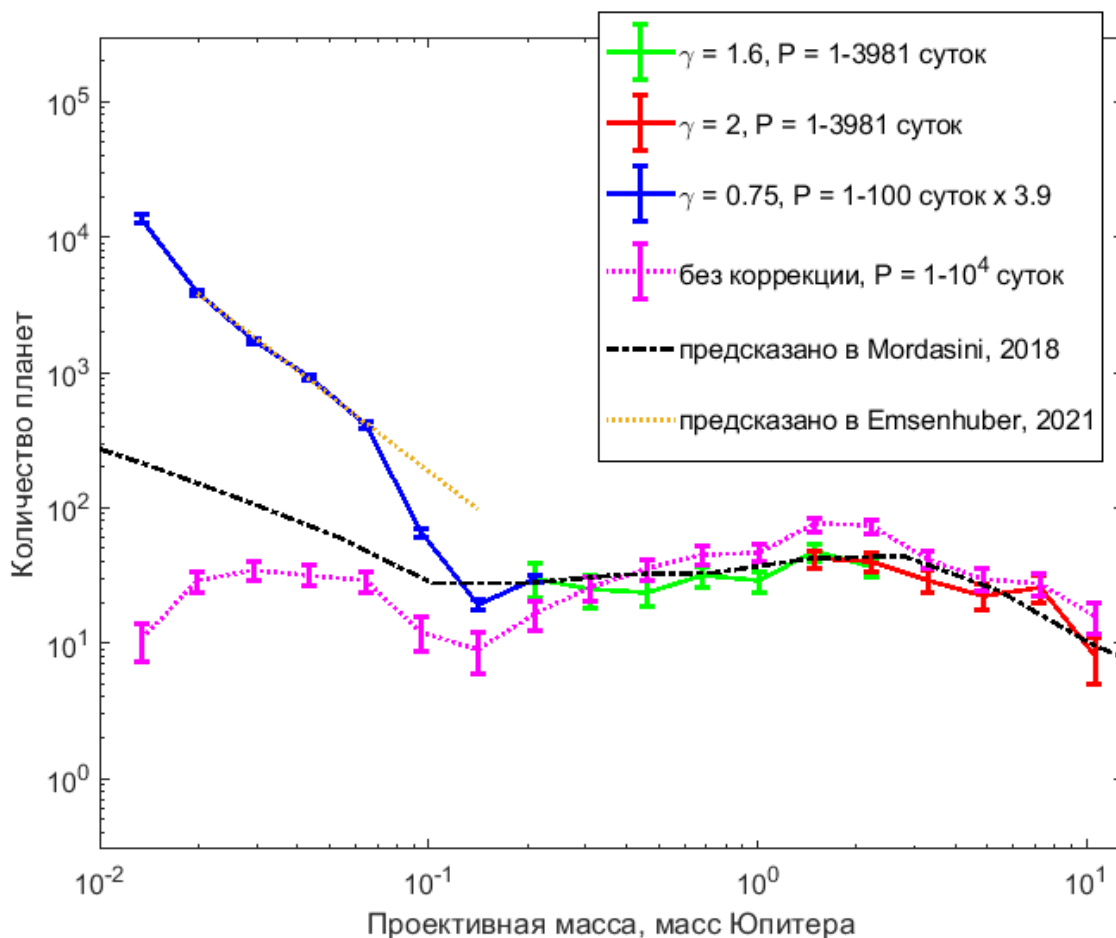


Рисунок 1. Скорректированное распределение по минимальным массам 598 RV-планет с массами 0.011-13 масс Юпитера. Синяя сплошная линия показывает распределение маломассивных планет, зеленая и красная сплошные линии показывают скорректированное распределение планет средних масс и массивных планет. Точечная малиновая линия показывает первоначальное (не скорректированное) распределение RV-планет. Черная штрихпунктирная линия показывает распределение экзопланет по массам согласно теории популяционного синтеза [3], оранжевая точечная линия – распределение планет с массами 5-50 масс Земли согласно последним моделям популяционного синтеза [9].

При рассмотрении планет только у солнцеподобных звезд с массами 1.00 ± 0.25 солнечных масс (FGK) наблюдается отличие в распределении самых легких

планет (с массами менее 0.02 масс Юпитера или 6.3 масс Земли) – распределение становится плоским в логарифмическом масштабе ($dN/dm \rightarrow m^{-1}$).

Скорректированные распределения по орбитальным периодам планет малых, средних и больших масс отличаются друг от друга, что говорит о преимущественном (усредненном) строении планетных систем. Наиболее массивные планеты с минимальными массами 2.2-13 масс Юпитера находятся преимущественно на широких орбитах ($P > 100$ суток).

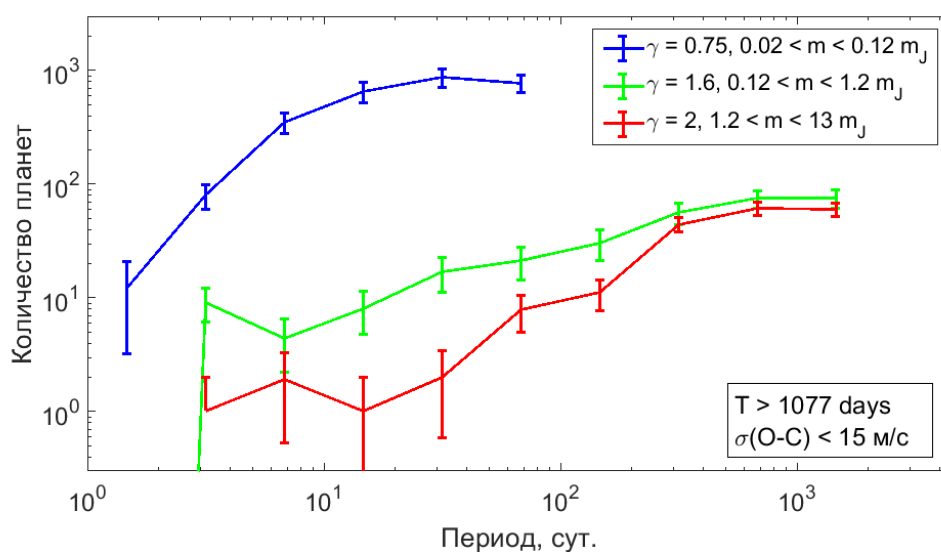


Рисунок 2. Скорректированные распределения по орбитальным периодам RV-планет малых (0.02-0.12 масс Юпитера), средних (0.12-1.7 масс Юпитера) и больших (1.7-13 масс Юпитера) масс показаны синей, зеленой и красной линиями, соответственно.

Скорректированные распределения RV-планет по орбитальным периодам согласуются с распределениями по орбитальным периодам транзитных экзопланет.

В **Главе 3** исследованы распределения по массам транзитных планет, открытых телескопом «Кеплер» и наземными наблюдательными программами.

Если планета находится в транзитной конфигурации, наклонение ее орбиты i известно, и можно определить не только минимальную массу $m \cdot \sin i$, как в случае RV-планет, но и истинную массу m . При этом наземные и космические

наблюдательные программы следует рассматривать по отдельности, поскольку факторы наблюдательной селекции для них существенно различаются.

Вследствие того, что в настоящее время массы большинства планет «Кеплера» еще не измерены, произведена коррекция, основанная на вычислении «коэффициента измеренности массы», который описывает разную долю планет «Кеплера» с измеренной массой в зависимости от их радиуса. Показана необходимость учета способа измерения массы транзитных планет, поскольку метод тайминга транзитов (TTV) позволяет измерять не физическую, а т.н. номинальную массу, которая при не равном нулю эксцентриситете орбит может в несколько раз превышать физическую массу. Также для всех транзитных планет была учтена вероятность транзитной конфигурации, обратно пропорциональная расстоянию между планетой и звездой.

Распределение по массам транзитных планет «Кеплера», скорректированное с помощью коэффициента измеренности массы k , различается при учете и не учете вероятности транзитной конфигурации, особенно в области массивных планет-гигантов (4-7 масс Юпитера). Это говорит о том, что распределение планет по массам зависит от расстояния между планетой и звездой (массивные планеты-гиганты находятся преимущественно на широких орбитах с периодом свыше 100 суток). Распределение по массам транзитных планет «Кеплера» с периодами короче 100 суток, скорректированное как с помощью коэффициента измеренности массы k , так и с учетом вероятности транзитной конфигурации, может быть аппроксимировано кусочным степенным законом с изломами в точках ~ 0.28 и ~ 1.7 масс Юпитера. В диапазоне 0.036-0.28 масс Юпитера показатель степени имеет значение -2.77 ($dN/dm \propto m^{-2.77 \pm 0.25}$). В области масс 0.28-1.7 масс Юпитера показатель степени имеет значение -1.17 ± 0.05 ($dN/dm \propto m^{-1.17 \pm 0.05}$), но совместим с -1 с учетом статистических погрешностей. В диапазоне 1.7-13 масс Юпитера планет мало, и статистические погрешности велики. При аппроксимации степенным законом показатель степени равен -2.22 ± 0.42 ($dN/dm \propto m^{-2.22 \pm 0.42}$).

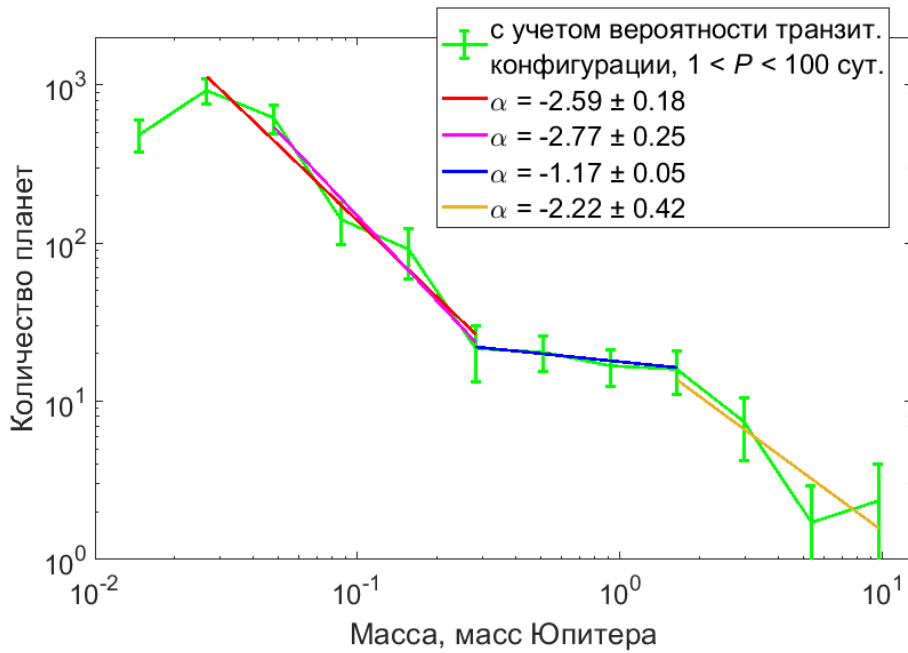


Рисунок 3. Скорректированное распределение по массам транзитных планет «Кеплера» и его аппроксимация кусочным степенным законом ($dN/dm \rightarrow m^\alpha$).

В отличие от распределения планет «Кеплера», распределение по массам транзитных планет, обнаруженных наземными наблюдательными программами, практически не изменяется при учете вероятности транзитной конфигурации, что объясняется ограниченным диапазоном их орбитальных периодов (не более 17 суток). В области 0.68-13 масс Юпитера это распределение может быть аппроксимировано степенным законом с показателем степени -2.15 ± 0.12 ($dN/dm \propto m^{-2.15 \pm 0.12}$).

В Главе 4 сравниваются распределения, полученные во 2 и 3 Главах. Поскольку прямое сравнение минимальных (проективных) масс и физических масс некорректно, а преобразование распределения по минимальным массам в распределение по физическим массам затруднено из-за низкого качества данных, для сравнения было проведено обратное преобразование распределения по массам транзитных планет в их распределение по минимальным массам.

В области 0.21-13 масс Юпитера оба распределения в пределах погрешностей находятся в хорошем согласии друг с другом. В области 0.02-0.21

масс Юпитера распределения по минимальным массам транзитных планет «Кеплера» и RV-планет имеют близкие наклоны ($\frac{dN}{dm} \propto m^{-2.5 \dots -3}$). Однако относительное количество планет «Кеплера» в области малых масс (0.02-0.21 масс Юпитера) примерно втрое превышает количество RV-планет. Вероятно, значительная доля RV-планет малых масс еще не выявлена.

Вероятность транзитной конфигурации обратно пропорциональна расстоянию между планетой и звездой, и подавляющее большинство транзитных планет являются короткопериодическими. При этом показано, что распределение по массам как RV-планет, так и транзитных планет зависит от орбитального периода (у большинства планет с массами свыше 2.2 масс Юпитера орбитальные периоды превышают 100 суток).

Заключение резюмирует основные результаты диссертации.

Приложение А содержит математический метод перехода от минимальных (проективных) величин ($v \cdot \sin i$, $m \cdot \sin i$) к истинным (v , m).

Приложение Б содержит параметры проанализированных экзопланет в табличном виде.

Цитируемая литература

1. Сайт Экзопланетного архива НАСА / [Электронный ресурс]
URL: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/> (дата обращения: 18.04.2022)
2. Энциклопедия внесолнечных планет / [Электронный ресурс]
URL: <http://exoplanet.eu/> (дата обращения: 25.01.2022)
3. Mordasini, C. (2018). Planetary Population Synthesis. In: Deeg, H., Belmonte, J. (eds) Handbook of Exoplanets . Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55333-7_143
4. Сайт орбитальной инфракрасной обсерватории «Джеймс Уэбб» / [Электронный ресурс] URL: <https://www.jwst.nasa.gov/> (дата обращения 25.01.2022)

5. «Всемирная космическая обсерватория — Ультрафиолет» / [Электронный ресурс] URL: wso.inasan.ru/rus/ (дата обращения 20.01.2022)
6. Сайт проекта PLATO / [Электронный ресурс] URL: <https://sci.esa.int/web/plato> (дата обращения 15.02.2022)
7. Сайт проекта ARIEL / [Электронный ресурс] URL: <https://arielmission.space/> (дата обращения 15.02.2022)
8. Сайт проекта WFIRST / [Электронный ресурс] URL: <https://roman.gsfc.nasa.gov/>
9. Emsenhuber A. et al. The New Generation Planetary Population Synthesis (NGPPS)-II. Planetary population of solar-like stars and overview of statistical results // *Astronomy & Astrophysics*. – 2021. – Т. 656. – С. A70.
10. Petigura E. A., Howard A. W., Marcy G. W. Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2013. – Т. 110. – №. 48. – С. 19273-19278.

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях:

1. Vladislava Ananyeva, Alexander Tavrov, Inna Shashkova, Andrey Yudaev, Anastasia Ivanova, Oleg Korablev, and Jean-Loup Bertaux. Exoplanet mass distribution considering selection factors for transit technique, постерный доклад на EPSC-DPS Joint Meeting 2019, 15-20 Sep 2019, Geneva, Switzerland.

2. V. Ananyeva, A. Ivanova, I. Shashkova, A. Venkster, A. Tavrov and J.-L. Bertaux. Mass distribution of exoplanets considering observation selection effects in the transit detection technique, устный доклад на 10-м Московском симпозиуме по Солнечной системе (10M-S3).

3. V. Ananyeva, J.-L. Bertaux and A. Tavrov. Mass distribution of transit planets depending on the host star spectral class (considered: K, G, F), устный доклад на 10-м Московском симпозиуме по Солнечной системе (10M-S3).

4. В.И. Ананьева, А.Е. Иванова, А.В. Тавров, О.И. Кораблев, Ж.-Л. Берто. Статистические распределения экзопланет по массам и орбитальным периодам с учетом наблюдательной селекции, устный доклад на конференции «Наземная астрономия в России. XXI век», САО, 21 – 25 сентября 2020 года.

5. V. Ananyeva, A. Ivanova, I. Shashkova, A. Tavrov, J.-L. Bertaux. Radial velocity-exoplanets distributions by masses and by orbital periods, устный доклад на Одиннадцатом московском международном симпозиуме по исследованиям Солнечной системы (11M-S3), ИКИ, 5 – 9 октября 2020 года.

6. Ананьева В.И., Тавров А.В., Кораблев О.И., Берто Ж.-Л. Распределение RV- и транзитных экзопланет по массам и орбитальным периодам с учетом наблюдательной селекции, доклад на Всероссийской Астрономической Конференции, Москва, 23-28 августа 2021 года.

7. Ananyeva, V., Tavrov, A., Korablev, O., and Bertaux, J.-L. Distribution of RV- and transiting exoplanets by masses and orbital periods taking into account observational selection, Europlanet Science Congress 2021, online, 13–24 Sep 2021, EPSC2021-802, <https://doi.org/10.5194/epsc2021-802>, 2021.

8. V. Ananyeva, A. Ivanova, I. Litosova, A. Tavrov, J.-L. Bertaux. Properties of RV-exoplanets' distributions by masses and by orbital periods, доклад 12MS3-EP-02 на The Twelfth Moscow Solar System Symposium, IKI RAS, 11-15 October 2021.

Публикации по теме диссертации

1. **В. И. Ананьева**, А. В. Тавров, А. А. Венкстерн, Д. В. Чурбанов, И. А. Шашкова, О. И. Кораблев, Ж.-Л. Берто. Распределение экзопланет-гигантов по истинным и проективным массам. Учет наблюдательной селекции // *Астрономический Вестник*, 2019, том 53, № 2, с. 133–146. DOI: 10.1134/S0320930X1901002X

2. А. Е. Иванова, **В. И. Ананьева**, А. А. Венкстерн, И. А. Шашкова, А.В.Юдаев, А. В. Тавров, О. И. Кораблев, Ж.-Л.Берто. Распределение транзитных экзопланет по массам с учетом факторов наблюдательной селекции // *Письма в*

Астрономический Журнал, 2019, том 45, №10, с. 1–8. DOI: 10.1134/S0320010819100048

3. **V.I. Ananyeva**, A. E.Ivanova, A.A. Venkstern, I.A. Shashkova, A.V. Yudaev, A.V. Tavrov, O.I. Korablev, and J.-L. Bertaux. Mass distribution of exoplanets considering some observation selection effects in the transit detection technique // *Icarus*, Volume 346, August 2020, 113773. DOI: 10.1016/j.icarus.2020.113773

4. **В. И. Ананьева**, А. Е. Иванова, А. А. Векстерн, А. В. Тавров, О. И. Кораблев, Ж.-Л. Берто. Распределение экзопланет по массам в зависимости от спектрального класса родительских звезд // *Астрономический Вестник*, 2020, том 54, № 3, с. 195–207. DOI: 10.31857/S0320930X20030019

5. А.Е. Иванова, О.Я. Яковлев, **В.И. Ананьева**, И. А. Шашкова, А.В. Тавров, О.И. Кораблев, Ж.-Л. Берто. Метод «окна видимости» для учета наблюдательной селекции в статистике экзопланет, открытых по измерениям лучевых скоростей // *Письма в Астрономический Журнал*, 2021, том 47, №1, с. 46–51. DOI:10.31857/S0320010821010058

6. О. Яковлев, А. Иванова, **В. Ананьева**, И. Шашкова, А. Юдаев, О. Кораблев, Ж.-Л. Берто, А. Тавров. Распределение транзитных экзопланет по массе с использованием зависимостей масса-радиус. Структурирование внутри планетных систем // *Астрономический Вестник*, 2021, том 55, № 3, с. 213–231. DOI: 10.31857/S0320930X21030099

7. O.Ya. Yakovlev, **V. I. Ananyeva**, A. E Ivanova, A. V. Tavrov. Comparison of the mass distributions of short-period exoplanets detected by transit and RV methods // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Volume 509, Issue 1, January 2022, Pages L17–L20. <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slab115>