

УТВЕРЖДАЮ



Директор ИКИ РАН

чл. корр. РАН

А.А. Петрукович

«16» мая 2022 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук

Диссертация «Распределение экзопланет по массам и орбитальным периодам с учетом наблюдательной селекции» выполнена в отделе Физики планет и малых тел Солнечной системы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). В период подготовки диссертации соискатель Ананьева Владислава Игоревна работала в ИКИ РАН в должности младшего научного сотрудника.

Научный руководитель: доктор технических наук, Тавров Александр Викторович, работает заведующим лабораторией в ИКИ РАН.

По результатам рассмотрения диссертации «Распределение экзопланет по массам и орбитальным периодам с учетом наблюдательной селекции» принято следующее заключение:

### **Актуальность и направление исследования**

Данная диссертационная работа направлена на выявление и учет факторов наблюдательной селекции при построении распределений по массам и орбитальным периодам экзопланет, обнаруженных методом фотометрических транзитов и спектроскопическим методом лучевых скоростей. Работа актуальна в свете недавнего (в декабре 2021 года) запуска космического инфракрасного телескопа им. Джеймса Вебба (JWST). Также на ближайшие годы запланирован запуск целой плеяды космических телескопов: на 2025 год – российского ультрафиолетового телескопа «Спектр-УФ» (WSO-UV), на 2026 год – миссии ЕКА PLATO, посвященной широкомасштабным поискам экзопланет транзитным методом, на 2029 год –

инфракрасного телескопа ARIEL, посвященного изучению экзопланетных атмосфер, и т.д. Изучение экзопланет – бурно развивающаяся область астрофизики, имеющая большое и практическое, и мировоззренческое значение. Статистические исследования экзопланет являются важным инструментом такого изучения, они позволяют верифицировать космогонические теории, предсказывают количество планет разных типов (в частности, планет земного типа в обитаемой зоне), указывают на значимые физические процессы при формировании и эволюции планетных систем.

На данный момент количество известных экзопланет превысило 5 тысяч, причем свыше 95% из них обнаружено двумя методами – методом фотометрических транзитов и спектроскопическим методом лучевых скоростей родительских звезд (RV). Метод лучевых скоростей позволяет измерять массы планет. Существует несколько каталогов (баз данных) по экзопланетам, в частности, Экзопланетный архив НАСА и Энциклопедия внесолнечных планет ЕКА. Однако распределения, построенные непосредственно из этих каталогов, искажены наблюдательной селекцией и, следовательно, недостоверны. Необходим учет эффектов наблюдательной селекции и их коррекция для восстановления истинных статистических распределений экзопланет, в частности, по массам и орбитальным периодам.

Факторы наблюдательной селекции различаются как для разных методов поиска экзопланет, так и для разных инструментов и наблюдательных программ, ведущих поиски в рамках одного метода. В настоящей диссертационной работе рассмотрены по отдельности три группы планет – транзитные планеты, обнаруженные космическим телескопом им. Кеплера, транзитные планеты, обнаруженные наземными наблюдательными программами, и планеты, открытые методом лучевых скоростей (RV-планеты). Распределение по массам транзитных планет, обнаруженных «Кеплером», нуждается в коррекции, связанной с разной долей планет с измеренной массой в зависимости от радиуса планеты. Распределение по массам транзитных планет, обнаруженных наземными наблюдательными программами, практически не искажено наблюдательной селекцией только в области планет-гигантов с массами больше  $\sim 0.5$  масс Юпитера. Для всех транзитных планет необходимо учитывать вероятность транзитной конфигурации, обратно пропорциональную расстоянию между планетой и звездой, и способ измерения массы планеты – метод тайминга транзитов (TTV) позволяет измерять лишь номинальные массы, которые могут в несколько раз превосходить истинные, что нередко приводит к нефизично большим значениям массы и средней плотности таких планет. Наконец, RV-планеты открыты на спектрографах разной чувствительности, у звезд с разным уровнем активности, в рамках наблюдательных программ разной

продолжительности, с разным количеством измерений лучевой скорости. Все это делает существующие каталоги экзопланет существенно неоднородными.

Для учета разной доли планет «Кеплера» с измеренной массой в зависимости от радиуса планеты был введен коэффициент измеренности массы  $k$ , показывающий долю планет с измеренной массой для каждого интервала радиусов  $R + \Delta R$ . Коэффициент  $k$  близок к 1 в области планет-гигантов, но падает ниже 0.2 для планет с радиусами  $< 4$  радиусов Земли. Для коррекции распределения планет «Кеплера» по массам каждая планета «Кеплера» с измеренной массой бралась со статистическим весом, обратным коэффициенту измеренности массы в том интервале, куда попадает ее радиус.

Для учета неоднородности каталогов RV-планет было введено «окно видимости» – матрица на диаграмме «Проективная масса – Орбитальный период» ( $m, P$ ), элементы которой  $V(m, P)$  представляют собой вероятность обнаружить планету с данными проективной массой  $m$  и орбитальным периодом  $P$ . Для коррекции распределения RV-планет по проективным массам каждая планета бралась со статистическим весом, обратным значению элемента матрицы  $V(m, P)$ , соответствующего ее проективной массе и орбитальному периоду ( $m, P$ ).

Итоговые скорректированные распределения экзопланет по массам согласуются друг с другом и следуют кусочному степенному закону с изломами при  $\sim 0.14$  и  $\sim 1.7$  масс Юпитера. Распределение планет малых масс (0.02-0.14 масс Юпитера) следует степенному закону с показателем степени  $-2.5 \dots 3$ . Распределение планет средних масс (0.14-1.7 масс Юпитера) следует степенному закону с показателем степени  $-1.0 \pm 0.2$ . Распределение массивных планет (1.7-13 масс Юпитера) следует степенному закону с показателем степени  $-2.0 \pm 0.2$ . Кроме того, в области 0.087-0.21 масс Юпитера наблюдается глубокий минимум, вызванный резким дефицитом планет этой массы с короткими орбитальными периодами (т.н. «пустыней горячих непунов»).

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 проективными массами 2.2-13 масс Юпитера находятся преимущественно на широких орбитах ( $P > 100$  суток).

## **Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации**

Автор самостоятельно разработал методы учета наблюдательной селекции при анализе статистических распределений транзитных планет и планет, обнаруженных методом лучевых скоростей, провел поиск и отбор архивных данных, необходимых для коррекции статистических распределений.

Программное обеспечение в среде MatLab® для расчета и последующего анализа статистических распределений экзопланет разработано, отлажено и применено на практике автором самостоятельно. На основе полученной базы данных автор самостоятельно провёл исследования, решая самостоятельно поставленные задачи. Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены при определяющем вкладе автора при содействии соавторов публикаций.

## **Степень достоверности результатов проведенного исследования**

Результаты работы докладывались на семинарах отдела «Физики планет и малых тел Солнечной системы» в ИКИ РАН, а также на всероссийских и международных конференциях: Европейских Планетных Конгрессах (EPSC), Московских международных симпозиумах по исследованиям Солнечной системы (M-S<sup>3</sup>), Всероссийской Астрономической Конференции, конференции «Наземная астрономия в России. XXI век» в САО, Школах-семинарах «Атмосферы планет: от земной группы к экзопланетам».

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

## **Научная новизна полученных результатов**

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 и практическая значимость результатов исследования**

Полученные результаты демонстрируют важность учета факторов наблюдательной селекции и свидетельствуют зависимости массового распределения экзопланет от их орбитальных периодов, т.е. об усредненном строении планетных систем. Полученные распределения находятся в хорошем согласии с космогонической теорией популяционного синтеза и могут быть использованы для оценок распространенности планет различных типов в Галактике.

Вместе с тем, ряд обнаруженных особенностей статистических распределений отличается от теоретически предсказанных 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  $\sim 0.08-0.21$  масс Юпитера в распределении по массам планет с короткими орбитальными периодами – известна как «пустыня горячих непунов».

### **Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем**

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

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 регуляризации данных при помощи «окна видимости» для учета наблюдательной селекции в статистике экзопланет, открытых методом лучевых скоростей, *ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ*, 2021, том 47, №1, с. 1–7. 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. Oleg 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>

Все работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах РИНЦ, Web of Science и Scopus. Все основные положения диссертационной работы опубликованы в указанных статьях.

**Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «01.03.02 –  
Астрофизика и звездная астрономия»**

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующему разделу паспорта специальности «01.03.02– Астрофизика и звездная астрономия»: «Исследования физических свойств космических объектов (планет, звезд, галактик и их систем) межпланетной, околозвездной, межзвездной и межгалактической среды, базирующиеся на астрономических наблюдениях».

**ВЫВОД.** Кандидатская диссертация Ананьевой Владиславы Игоревны «Распределение экзопланет по массам и орбитальным периодам с учетом наблюдательной селекции» соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия.

Заключение принято на заседании НТС отдела «Физики планет» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 11 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» – 11 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол от «26» мая 2022 г.

Председатель НТС отдела 53 ИКИ РАН,

д.ф.-м.н., чл.корр. РАН

О.И. Кораблев

Секретарь НТС отдела 53 ИКИ РАН,

к.ф.-м.н.

А.А. Федорова