

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

Д 002.113.04 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук, 117997, ГСП-7, Москва, Профсоюзная ул. д. 84/32, по диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 11 октября 2022 г. протокол № 2 о присуждении Ананьевой Владиславе Игоревне, гражданке РФ, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Распределение экзопланет по массам и орбитальным периодам с учетом наблюдательной селекции», по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звёздная астрономия» принята к защите 05 августа 2022 г. (протокол №1) диссертационным советом Д 002.113.04, созданным на базе Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук, 117997 г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32, приказ N 25/нк от 28.01.2021 г.

Соискатель – Ананьева Владислава Игоревна, 1969 года рождения, окончила Физический факультет Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова в 1992 году. С 2013 года работала в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) главным специалистом, с 2020 года работает в ИКИ РАН младшим научным сотрудником.

Диссертация выполнена в Отделе физики планет ИКИ РАН.

Научный руководитель: доктор технических наук Тавров Александр Викторович, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией 501 ИКИ РАН.

Официальные оппоненты:

Иванов Борис Александрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института динамики геосфер Российской академии наук и

Токовинин Андрей Аврельевич, доктор физико-математических наук, астроном Межамериканской обсерватории Серро-Тололо, Ла-Серена (Чили),

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ имени А.Ф. Иоффе), г. Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, составленном старшим научным сотрудником лаборатории Астрофизики высоких энергий к.ф.-м.н. А.М. Красильщиковым, и руководителем Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. А.М. Быковым, и утверждённом заместителем директора ФТИ имени А.Ф. Иоффе д.ф.-м.н. П.Н. Брунковым, отмечает, что выводы, полученные в диссертации Ананьевой В.И., дают возможность увидеть актуальное, с учетом наблюдательной селекции, представление о популяции экзопланет в нашей Галактике, а также понять, в каком направлении необходимо развивать инструментальную базу, нацеленную на поиск новых

экзопланет, рассматриваемая диссертационная работа отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, автор диссертации заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия».

Соискатель имеет **14** опубликованных работ, в том числе в рецензируемых журналах **8** работ, по теме диссертации опубликовано **7** работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано **7** работ.

Наиболее значимые научные работы 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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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 АСТРОНОМИЧЕСКИЙЖУРНАЛ*, 2021, том 47, №1, с. 1–7. DOI: [10.31857/S0320010821010058](https://doi.org/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](https://doi.org/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>

На автореферат диссертации поступил положительный отзыв от старшего научного сотрудника лаборатории атмосферы Арктики ФГБНУ «Полярный геофизический институт» к.ф.-м.н. Ю.Н. Куликова.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации определялся их авторитетом в научном сообществе, компетентностью в астрофизике, звёздной астрономии и физике планет, которые подтверждаются публикациями в международных и российских журналах.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Существующие каталоги экзопланет, даже будучи полными, объединяют планеты, открытые разными методами, с разной точностью наблюдательных инструментов и разной продолжительностью наблюдательных программ, следовательно, являются существенно неоднородными. Неучет этой неоднородности приводит к значительному искажению реальных статистических распределений экзопланет и недостоверным выводам.

Поскольку факторы наблюдательной селекции различаются для разных методов поиска экзопланет, экзопланеты, обнаруженные методом лучевых скоростей и методом фотометрических транзитов, были рассмотрены по отдельности. Для планет, обнаруженных методом лучевых скоростей (RV), проанализированы основные факторы наблюдательной селекции, вызванные разной точностью спектрографов, разным уровнем активности родительских звезд и разной продолжительностью наблюдений. Предложен матричный метод коррекции наблюдательной селекции («окно видимости»), который вычисляет вероятность обнаружения RV-планеты с данными массой и орбитальным периодом выбранной совокупностью наблюдательных программ. При коррекции каждая обнаруженная планета учитывается со статистическим весом, обратным вероятности ее обнаружения. 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 дифференциальный индекс масс равен $-2.5 \dots -3$, в области 0.21-1.7 масс Юпитера – $-0.8 \dots 1.0$, в области 1.7-13 масс Юпитера – $-1.7 \dots -2.0$. В области 0.087-0.21 масс Юпитера наблюдается минимум, обусловленный резким дефицитом планет на короткопериодических орбитах (с орбитальными периодами меньше 10 суток), называемым в публикациях «пустыней горячих нептоунов».

Среди планет, обнаруженных транзитным методом, рассмотрены по отдельности планеты, обнаруженные космическим телескопом «Кеплер», и планеты, обнаруженные наземными наблюдательными программами. Поскольку массы большинства подтвержденных планет «Кеплера» еще не измерены, соискателем произведена коррекция, основанная на вычислении «коэффициента измеренности массы», который описывает разную долю планет «Кеплера» с измеренной массой в зависимости от их радиуса. При коррекции каждая планета «Кеплера» учитывалась со статистическим весом, обратным коэффициенту измеренности массы,

соответствующему ее радиусу. Показана необходимость учета способа измерения массы транзитных планет «Кеплера», поскольку метод тайминга транзитов (TTV) в случае резонансных конфигураций 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.

Скорректированное распределение по массам транзитных планет «Кеплера» с периодами 1-100 суток аппроксимируется кусочным степенным законом с изломами в точках ~ 0.28 и ~ 1.7 масс Юпитера. В диапазоне 0.036-0.28 масс Юпитера дифференциальный индекс масс имеет значение -2.77 ± 0.25 , в области 0.28-1.7 масс Юпитера – -1.17 ± 0.05 , но совместим с -1 с учетом статистических погрешностей, в области 1.7-13 масс Юпитера – -2.22 ± 0.42 .

Распределение по массам транзитных планет, обнаруженных наземными наблюдательными программами, не требует учета разной доли планет с измеренной массой и исключения TTV-планет, поскольку у 98% планет, обнаруженных наземными программами, масса измерена методом лучевых скоростей. Однако соискателем учтена низкая точность фотометрических измерений, проводимых наземными автоматическими телескопами малой апертуры, не позволяющая эффективно обнаруживать планеты с радиусами меньше 0.7-0.8 радиусов Юпитера у звезд солнечного типа. Ограничиваясь областью планет-гигантов, было показано, что распределение по массам транзитных планет, обнаруженных наземными наблюдательными программами, в области 0.68-13 масс Юпитера следует степенному закону с дифференциальным индексом масс, равным -2.15 ± 0.12 .

Проведено сравнение скорректированных распределений транзитных планет и планет, обнаруженных методом лучевых скоростей, друг с другом и с актуальными космогоническими теориями популяционного синтеза, показано, что в целом они согласуются. Показано, что распределения по орбитальным периодам планет малых (0.02-0.14 масс Юпитера), средних (0.14-0.17 масс Юпитера) и больших (1.7-13 масс Юпитера) масс различаются между собой, что говорит о наличии преимущественной структуры планетных систем, где планеты малых масс, как правило, находятся на короткопериодических орбитах, а планеты больших масс – на долгопериодических орбитах, аналогично планетам Солнечной системы.

Научная и практическая значимость исследования обоснована тем, что:

Показана необходимость учета наблюдательной селекции при анализе статистических распределений экзопланет (неучет наблюдательной селекции приводит к существенной недооценке количества планет малых масс и переоценке количества планет-гигантов на короткопериодических орбитах). Показано, что скорректированные распределения транзитных планет и планет, обнаруженных методом лучевых скоростей, находятся в хорошем согласии друг с другом и с современными космогоническими теориями популяционного синтеза. Проведенные статистические исследования дают новую информацию о преимущественном строении

планетных систем у других звезд и могут быть использованы для оценок распространенности планет различных типов в Галактике.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Результаты работы докладывались на семинарах, российских и международных конференциях. Все основные результаты работы и ее защищаемые положения подробно изложены в публикациях диссертанта в ведущих рецензируемых журналах, входящими в перечень ВАК и индексируемых научными базами Scopus, Web of Science, РИНЦ.

Личный вклад соискателя:

Автором самостоятельно разработаны автоматизированные методы учета наблюдательной селекции при анализе статистических распределений транзитных планет и планет, обнаруженных методом лучевых скоростей («коэффициент измеренности массы» и «окно видимости»), проведен поиск и отбор архивных данных, написана и отложена серия кодов в среде MatLab[®], проведена интерпретация полученных результатов.

На основе отобранных данных автор самостоятельно провёл исследования, решая самостоятельно поставленные задачи. Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены при определяющем вкладе автора при содействии соавторов публикаций.

На заседании 11 октября 2022 года, проводившемся в удаленном интерактивном режиме, диссертационный совет пришёл к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. № 842, и принял решение за решение ряда задач, имеющих значение для развития астрофизики и наблюдений популяции экзопланет, присудить Ананьевой Владиславе Игоревне учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования с использованием информационно-коммуникационных технологий диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 14 докторов наук по специальности диссертации 01.03.02, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, проголосовали: « за » присуждение учёной степени 14, «против» присуждения учёной степени нет, недействительных бюллетеней 1.

Заместитель председателя диссертационного совета Д 002.113.04

д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

О.И. Кораблев

Учёный секретарь диссертационного совета Д 002.113.04

к.ф.-м.н.

А.Ю. Ткаченко



Дата оформления заключения 11 октября 2022 г.