

## ОТЗЫВ

официального оппонента,  
доктора физико-математических наук Иванова Бориса Александровича  
на диссертацию Ананьевой Владиславы Игоревны  
«Распределение экзопланет по массам и орбитальным периодам  
с учетом наблюдательной селекции»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия.

Диссертация Ананьевой В.И. посвящена построению распределений экзопланет по массам и орбитальным периодам с учетом многочисленных факторов наблюдательной селекции. Рассматривались экзопланеты, обнаруженные методом фотометрических транзитов и методом лучевых скоростей. Поскольку разные наблюдательные программы имеют разную эффективность в обнаружении экзопланет с разными массами и орбитальными периодами, значительная доля планет малых масс и/или больших орбитальных периодов остается не обнаруженной. Это приводит к искажению распределений, непосредственно получаемых из существующих каталогов экзопланет, а именно, к недооценке количества планет малых масс и переоценке количества массивных планет с малыми орбитальными периодами (т.н. «горячих юпитеров»).

В диссертационной работе рассмотрены по отдельности три группы планет: транзитные планеты, обнаруженные космическим телескопом «Кеплер», транзитные планеты, обнаруженные наземными наблюдательными программами, не транзитные планеты, открытые методом лучевых скоростей. Для каждой из этих групп факторы наблюдательной селекции различаются. В диссертационной работе для каждой группы планет были проанализированы основные факторы наблюдательной селекции и предложены методы их учета.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Объем диссертации составляет 106 страниц.

**В первой главе** кратко описывается история экзопланетных исследований с 1995 года, когда была открыта первая планета у звезды главной последовательности 51 Пегаса b. Проведен исторический обзор попыток установить распределение экзопланет по минимальным массам  $m \sin i$ , где  $m$  – масса планеты,  $i$  – угол между нормалью к плоскости ее орбиты и лучом зрения, который в общем случае неизвестен. Описаны попытки разных авторов сделать поправки на неоднородность данных, следующую из



разной точности спектрографов, разного уровня активности родительских звезд и разной продолжительности наблюдательных программ. Как правило, для исключения неоднородности наблюдательных данных рассматривались только планеты, обнаруженные на одном спектрографе с фиксированной инструментальной точностью или на инструментах одной обсерватории. В итоге распределения, полученные разными авторами, плохо согласуются друг с другом.

**Во второй главе**, составляющей половину объема диссертационной работы, изучалось распределение экзопланет, обнаруженных методом лучевых скоростей (RV-планет), по минимальным массам и орбитальным периодам. Для учета неоднородности данных предложен метод, названный «окно видимости». «Окно видимости» – матрица на диаграмме «Минимальная масса – Орбитальный период», элементы которой представляют собой вероятности обнаружить планету с данными минимальной массой и орбитальным периодом. Для коррекции наблюдаемых распределений каждая открытая (реальная) планета учитывалась со статистическим весом, обратным вероятности ее обнаружения.

Матрица «окна видимости» составлена для диапазона минимальных масс от 0.011 до 13 масс Юпитера, и диапазона орбитальных периодов от 1 до  $10^4$  суток, разбитых на 12 интервалов, равных в логарифмическом масштабе. В центр каждой ячейки помещается искусственная планета и оценивается будет ли она обнаружена существующими или ранее существовавшими наблюдательными программами.

В диссертационной работе искусственная планета считалась обнаруживаемой, если для нее одновременно выполняются два условия: (1) ее орбитальный период меньше, чем удвоенное полное время наблюдений, (2) полуамплитуда колебаний лучевой скорости звезды, вызванная гравитационным влиянием искусственной планеты, превышает величину среднего отклонения от наилучшей кеплеровской кривой, умноженного числовой коэффициент порядка 1. Этот коэффициент,  $\gamma$  является параметром модели и подбирается эмпирически путем сравнения с величинами для уже известных RV-планет разных масс. Для искусственных планет с массами 0.011-0.14 масс Юпитера автор принимает  $\gamma = 0.75$ , для планет с массами 0.14-2.2 масс Юпитера  $\gamma = 1.6$ , для планет с массами 2.2-13 масс Юпитера  $\gamma = 2$ .

Этот подход выглядит наглядным, но упрощенным. Способность выявлять когерентные сигналы из зашумленных данных в явном виде зависит от количества измерений, что в предложенном подходе не учитывается. Таким образом, в диссертационной работе применяется



усредненный критерий обнаружимости искусственной планеты вместо индивидуального.

Для вычисления точных значений элементов матрицы «окна видимости» необходимы сведения о всех наблюдавшихся звездах – как тех, у которых были обнаружены планеты, так и тех, у которых планет не обнаружено. Вычисление матрицы «окна видимости» только по звездам с обнаруженными планетами приводит к занижению количества планет малых масс, которое может достигать порядка величины. В диссертационной работе предложен способ, позволяющий обойти эту трудность. Предполагая, что распределение планет по массам при фиксированном орбитальном периоде следует кусочно-степенному закону, автор вычисляет отношение распространенностей планет разных масс и точные значения элементов матрицы «окна видимости». Показатель степени выбирается путем сравнения полученного решения со скорректированным распределением RV-планет, т.е. выбирается самосогласованное решение.

Часть элементов матрицы «окна видимости» содержит нулевые значения, что соответствует невозможности обнаружения планет малых масс с большими орбитальными периодами. Область нулевых значений, соответствующих невозможности обнаружения планет малых масс с большими орбитальными периодами, была названа «слепым пятном», в котором современными средствами невозможно обнаружить планеты. Например, колебания Солнца под действием Земли вокруг барицентра Солнечной системы с периодом в 1 год имеют полуамплитудой  $\sim 9$  см/сек, что в несколько раз меньше точности единичного измерения самого точного на данный момент спектрографа ESPRESSO (25 см/сек). Поскольку наличие «слепого пятна» делает невозможным коррекцию на всей рассмотренной диаграмме, в диссертационной работе рассматривается (1) скорректированное распределение по минимальным массам и орбитальным периодам планет с массами 0.02-13 масс Юпитера и периодами 1-100 суток, и (2) распределение планет с массами 0.21-13 масс Юпитера и периодами 1-3981 суток. Получение скорректированного распределения планет малых масс возможно только для коротких орбитальных периодов.

Полученное во 2 главе скорректированное распределение по минимальным массам планет с массами 0.21-13 масс Юпитера с периодами 1-100 суток заметно отличается от распределения планет тех же масс с периодами 1-3981 суток: планеты с массами свыше 2 масс Юпитера находятся преимущественно на орбитах периодом более 100 суток. По модели автора распределение по массе планет суток следует кусочно-степенному закону. В области 0.087-0.21 масс Юпитера наблюдается



минимум, связанный с хорошо известным дефицитом планет с периодами короче 10 суток, называемый «пустыней горячих непутов».

Во 2 главе скорректированные распределения RV-планет по орбитальным периодам сравниваются с распределением по орбитальным периодам транзитных планет «Кеплера», демонстрируя хорошее согласие.

Скорректированные распределения RV-планет по минимальным массам сравниваются с предсказаниями космогонических теорий, в частности, с моделью популяционного синтеза. Распределение в области 0.21-13 масс Юпитера хорошо согласуется с теоретическими исследованиями, обобщенными в 2018 году Кристофом Мордасини, распределение в области 0.02-0.087 масс Юпитера – с опубликованными после 2021 года моделями, предсказывающими распределение с показателем степени -3 для экзопланет с массами в 5-50 масс Земли.

В целом предложенный метод коррекции распределений RV-планет выглядит перспективным и универсальным, однако его конкретная реализация требует определенной доработки. Можно порекомендовать автору диссертации вычислять элементы матрицы «окна видимости», используя индивидуальное значение  $\gamma$  для каждой звезды с учетом количества измерений ее лучевой скорости.

В **третьей главе** изучалось распределение по массам транзитных планет. Были рассмотрены по отдельности планеты, обнаруженные космическим телескопом «Кеплер», и планеты, открытые многочисленными наземными наблюдательными программами. В случае транзитной конфигурации наклонение орбиты планеты  $i$  известно, и можно измерить не только минимальную массу  $m \sin i$ , как в случае RV-планет, но и истинную массу  $m$ . Автор предлагает учитывать способ, которым была измерена масса транзитных планет, рассматривая по отдельности случаи, когда масса была измерена методом лучевых скоростей, с помощью тайминга транзитов (TTV), или с помощью фотодинамического анализа. Последние два метода применимы только к многопланетным системам, поскольку в этих случаях массы вычисляются путем регистрации гравитационного влияния планет друг на друга. Вариации времени наступления транзитов наиболее велики и чаще всего доступны измерению в случае, если планеты находятся в орбитальном резонансе низкого порядка (например, 2:1 или 3:2). Однако в этом случае амплитуда вариаций зависит не только от масс планет, но и от эксцентриситетов их орбит. Фактически, истинные массы этих планет остаются неизвестными, поэтому эти планеты были исключены автором из рассмотрения.



Автор считает, что итоговое скорректированное распределение планет «Кеплера» по массам следует кусочно-степенному закону с изломами при массе планет в 0.28 и 1.7 масс Юпитера.

Также в **главе 3** были рассмотрены транзитные планеты, обнаруженные наземными транзитными наблюдательными программами. Особенность этих программ в сравнительно низкой фотометрической точности, не позволяющей обнаруживать транзиты небольших планет. Подавляющее большинство транзитных планет, обнаруженных наземными наблюдательными программами, являются горячими юпитерами. Это означает, что распределение по массам не искажено наблюдательной селекцией только в области планет-гигантов, т.е. планет с массами больше 0.4-0.5 масс Юпитера.

В **четвертой главе** автор сравнивает скорректированные распределения RV-планет и транзитных планет «Кеплера». Прямое сравнение обоих распределений некорректно, поскольку для RV-планет известно распределение по минимальным массам  $m \sin i$ , а для транзитных планет – по массам  $m$ . Формальное решение перехода от минимальных (проективных) величин к истинным было предложено Чандрасекаром и Мюнхом в 1950 году, однако оно требует данных очень высокого качества. Поэтому для сравнения распределений автор предлагает выполнить обратное преобразование – распределение транзитных планет «Кеплера» по массам было преобразовано в их распределение по минимальным массам. Результаты сравнения показывают, что при общем сходстве распределений относительное количество RV-планет с массами 0.02-0.21 масс Юпитера примерно втрое меньше, чем планет «Кеплера». Это говорит о недооценке количества RV-планет с малой массой и необходимости доработки критериев обнаружимости.

Несколько замечаний по содержанию и оформлению диссертационной работы.

1. Оппонент считает, что при известном эффекте «недомера» малых объектов, было бы интересным сравнить методы коррекции распределений малых экзопланет и астероидов Солнечной системы. В отношении статистики астероидов были предложены различные методы коррекции распределений объектов по размерам и элементам орбит для компенсации «недомера» малых тел.

2. В подавляющем большинстве случаев автор использует странный способ построения подписей под рисунками – сначала располагается пояснительный текст, и лишь в последней строке подписи – номер рисунка и его название.



3. В нескольких местах автор использует жаргонизм «Бары ошибок оценены по Пуассону», что, видимо, означает «графические интервалы ошибок оценены по распределению Пуассона».

Несмотря на мелкие замечания, диссертация выполнена на высоком научном уровне и является законченной научно-исследовательской работой. В диссертации решены важные научные задачи. Содержание диссертации соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Работа хорошо оформлена. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Опубликованные в ведущих зарубежных и отечественных научных журналах результаты В.И. Ананьевой, представленные в докладах на российских и международных конференциях, достаточно полно отражают материал, изложенный в диссертации.

Все сказанное позволяет заключить, что диссертационная работа «Распределение экзопланет по массам и орбитальным периодам с учетом наблюдательной селекции» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу и отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия, а ее автор, Ананьева Владислава Игоревна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

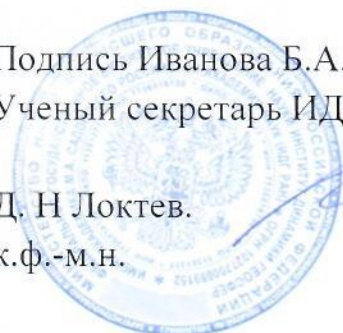
Официальный оппонент

Иванов Борис Александрович

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник  
шифр специальности оппонента – 04.00.22 – Физика твердой Земли

Подпись Иванова Б.А. заверяю  
Ученый секретарь ИДГ РАН

Д. Н. Локтев.  
к.ф.-м.н.



14.09.2022

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН),

119334, Ленинский проспект, 38, корпус 1, Москва, Россия

Телефон: (499)1376611

Web: <http://idg.chph.ras.ru>

Email: — [geospheres@idg.ras.ru](mailto:geospheres@idg.ras.ru)