



Cerro Tololo Inter-American Observatory  
Community Science and Data Center  
Gemini Observatory  
Kitt Peak National Observatory  
Vera C. Rubin Observatory

noirlab.edu  
info@noirlab.edu

NOIRLab Headquarters  
950 North Cherry Avenue  
Tucson, Arizona 85719, USA  
+1 520 318 8000

NOIRLab Chile Base  
Recinto de AURA  
Avda. Juan Cisternas 1500  
La Serena, Chile  
+56 51 220 5200

NOIRLab Hawai'i Base  
670 N. A'ohoku Place  
Hilo, Hawai'i 96720, USA  
+1 808 974 2500

NOIRLab, the US center for ground-based optical-infrared astronomy, operates the international Gemini Observatory (a facility of NSF, NRC-Canada, ANID-Chile, MCTIC-Brazil, MINCyT-Argentina, and KASI-Republic of Korea), Kitt Peak National Observatory (KPNO), Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO), the Community Science and Data Center (CSDC), and the Vera C. Rubin Observatory. It is managed by the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) under a cooperative agreement with NSF and is headquartered in Tucson, Arizona.

ОТЗЫВ официального оппонента,  
доктора физико-математических наук Токовинина Андрея Аврельевича  
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.

В диссертационной работе В.И.Ананьевой исследовано распределение открытых к настоящему времени экзопланет по массе и периоду, исправленное за эффекты наблюдательной селекции. Методы коррекции и их верификация составляют основное содержание диссертации. Исследования экзопланет - модная и актуальная тема, которой посвящено огромное количество публикаций. Тысячи открытых планет позволяют изучать их статистику, что, в свою очередь, ведет к пониманию их происхождения, дает материал для сравнения с моделями. В то же время знание распределений нужно для планирования новых наблюдательных программ. Этими двумя обстоятельствами обоснована **актуальность** данного исследования.

Хотя большинство известных экзопланет открыты методом транзитов, именно классический метод лучевых скоростей (RV) играет ключевую роль, т.к. способен обнаруживать планеты на типичных (широких, 1-10 а.е.) орбитах. Прямые изображения с высоким контрастом выявляют планеты на еще больших расстояниях от звезд. Однако, таких планет, открытых наземными средствами, оказалось гораздо меньше, чем ожидали. Возможно, новые космические телескопы изменят положение, но пока именно RV дает основную пищу для сравнения с теорией. Этому методу уделено наибольшее внимание в диссертации.

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





Cerro Tololo Inter-American Observatory  
Community Science and Data Center  
Gemini Observatory  
Kitt Peak National Observatory  
Vera C. Rubin Observatory

noirlab.edu  
info@noirlab.edu

NOIRLab Headquarters  
950 North Cherry Avenue  
Tucson, Arizona 85719, USA  
+1 520 318 8000

NOIRLab Chile Base  
Recinto de AURA  
Avda. Juan Cisternas 1500  
La Serena, Chile  
+56 51 220 5200

NOIRLab Hawai'i Base  
670 N. A'ohoku Place  
Hilo, Hawai'i 96720, USA  
+1 808 974 2500

NOIRLab, the US center for ground-based optical-infrared astronomy, operates the international Gemini Observatory (a facility of NSF, NRC-Canada, ANID-Chile, MCTIC-Brazil, MINCyT-Argentina, and KASI-Republic of Korea), Kitt Peak National Observatory (KPNO), Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO), the Community Science and Data Center (CSDC), and the Vera C. Rubin Observatory. It is managed by the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) under a cooperative agreement with NSF and is headquartered in Tucson, Arizona.



В первой главе проведен обзор публикаций по экзопланетным исследованиям, в частности, посвященных статистическим распределениям внесолнечных планет по массам. Поскольку разные спектрографы отличаются разной внутренней (инструментальной) точностью, а разные наблюдательные программы – разной продолжительностью, совокупность полученных данных оказывается существенно неоднородной. Для учета этой неоднородности были предложены разные подходы – от полного игнорирования в самых ранних работах до учета только планет, открытых на одном спектрографе, одной обсерватории, или у звезд одного спектрального класса. В итоге распределения экзопланет по массам, полученные разными исследовательскими группами, плохо согласуются друг с другом.

Открытие экзопланет методом RV требует специальной аппаратуры и значительных затрат наблюдательного времени. Ввиду приоритетности данного направления в нем установилась нездоровая практика конкуренции, когда соперничающие группы скрывают промежуточные результаты (например, исходные списки звезд). Открытие каждой экзопланеты методом RV остается "штучной" работой. Вероятно, перспективные звезды-кандидаты получают приоритет относительно остальных звезд программы по числу наблюдений. Все эти скрытые обстоятельства влияют на выборку известных экзопланет и затрудняют учет селекции.

Во второй главе были рассмотрены внесолнечные планеты, обнаруженные методом лучевых скоростей (RV-планеты). В работе В.И.Ананьевой разработан упрощенный подход к учету селекции RV-планет. Принимаются во внимание лишь два известных параметра - точность измерений RV и их продолжительность для каждой планеты. Порог обнаружения связан с этими параметрами двумя коэффициентами, которые подбираются эмпирически исходя из распределений. Другие параметры, также влияющие на обнаружение (число наблюдений, их распределение по времени, эксцентриситет орбиты) не учитываются. Бинарные пороги обнаружения отдельных планет усредняются по всей выборке, и полученное таким образом "окно видимости" служит для перехода от наблюдаемого распределения к скорректированному.

Двумерная вероятность обнаружения планет  $W(P,m)$  ( $P$  - период,  $m$  - произведение массы на синус наклона орбиты), оцененная предложенным методом только по данным о самих планетах, является лишь первым грубым приближением. Более точная оценка  $V(P,m)$  требует данных о наблюдениях всей выборки, которые не публикуются. Предложен метод перехода от  $W$  к  $V$ , но он



Cerro Tololo Inter-American Observatory  
Community Science and Data Center  
Gemini Observatory  
Kitt Peak National Observatory  
Vera C. Rubin Observatory

noirlab.edu  
info@noirlab.edu

NOIRLab Headquarters  
950 North Cherry Avenue  
Tucson, Arizona 85719, USA  
+1 520 318 8000

NOIRLab Chile Base  
Recinto de AURA  
Avda. Juan Cisternas 1500  
La Serena, Chile  
+56 51 220 5200

NOIRLab Hawai'i Base  
670 N. A'ohoku Place  
Hilo, Hawai'i 96720, USA  
+1 808 974 2500

NOIRLab, the US center for ground-based optical-infrared astronomy, operates the international Gemini Observatory (a facility of NSF, NRC-Canada, ANID-Chile, MCTIC-Brazil, MINCyT-Argentina, and KASI-Republic of Korea), Kitt Peak National Observatory (KPNO), Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO), the Community Science and Data Center (CSDC), and the Vera C. Rubin Observatory. It is managed by the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) under a cooperative agreement with NSF and is headquartered in Tucson, Arizona.



требует предположений о распределении масс и периодов, и задача зацикливается. В диссертации приводятся примеры "согласованных" решений, когда степенное распределение по массам или периодам в определенных интервалах согласуется с исходными данными с учетом вероятности обнаружения  $V$ , соответствующей тому же степенному закону.

В диссертационной работе получены скорректированные распределения RV-планет (1) с минимальными массами от 0.02 до 13 масс Юпитера и орбитальными периодами 1-100 суток, и (2) с минимальными массами от 0.21 до 13 масс Юпитера и орбитальными периодами 1-3981 суток. Распределения планет-гигантов (0.21-13 масс Юпитера) с периодами 1-100 суток существенно отличается от распределения планет тех же масс с периодами 1-3981 суток – планеты с минимальными массами больше 2 масс Юпитера, как правило, имеют периоды больше 100 суток. Следует подчеркнуть, что распределения планет малых масс возможно получить только для коротких орбитальных периодов.

Распределения RV-планет по минимальным массам сравнивались с распределениями, следующими из космогонических теорий, в частности, теории популяционного синтеза, обобщенной в 2018 году Кристофом Мордасини, и теории популяционного синтеза нового поколения (работы 2021 года). Распределение планет с минимальными массами 0.21-13 масс Юпитера находится в хорошем согласии с теоретическими предсказаниями из работы Мордасини, а распределение планет с массами 0.02-0.087 масс Юпитера – с предсказаниями распределения планет с массами 5-50 масс Земли из работы Эмсенхубера и его коллег.

В третьей главе рассматривалось распределение по массам двух групп транзитных планет: планет, обнаруженных космическим телескопом «Кеплер», и планет, открытых наземными наблюдательными программами. Тут дело обстоит лучше, чем с RV-планетами, поскольку обеспечивается однородность выборок и методов (особенно в космических экспериментах), закон селекции проще, не мешают факторы конкуренции, а самих планет больше. Статистика транзитных планет - предмет многих работ. Оригинальный вклад данного исследования состоит в сравнении распределений планет, открытых методами транзитов и RV с учетом селекции, присущей каждому из методов. Массы измерены только у небольшой части (порядка 10%) транзитных планет, и это обстоятельство явно учитывается. Показано, что массы, оцененные по таймингу транзитов, ненадежны.



Cerro Tololo Inter-American Observatory  
Community Science and Data Center  
Gemini Observatory  
Kitt Peak National Observatory  
Vera C. Rubin Observatory

noirlab.edu  
info@noirlab.edu

NOIRLab Headquarters  
950 North Cherry Avenue  
Tucson, Arizona 85719, USA  
+1 520 318 8000

NOIRLab Chile Base  
Recinto de AURA  
Avda. Juan Cisternas 1500  
La Serena, Chile  
+56 51 220 5200

NOIRLab Hawai'i Base  
670 N. A'ohoku Place  
Hilo, Hawai'i 96720, USA  
+1 808 974 2500

NOIRLab, the US center for ground-based optical-infrared astronomy, operates the international Gemini Observatory (a facility of NSF, NRC-Canada, ANID-Chile, MCTIC-Brazil, MINCyT-Argentina, and KASI-Republic of Korea), Kitt Peak National Observatory (KPNO), Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO), the Community Science and Data Center (CSDC), and the Vera C. Rubin Observatory. It is managed by the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) under a cooperative agreement with NSF and is headquartered in Tucson, Arizona.



В четвертой главе проведено сравнение скорректированных распределений RV-планет и транзитных планет «Кеплера». Непосредственное сравнение обоих распределений не вполне корректно, поскольку для RV-планет известно распределение по минимальным массам  $m \sin i$ , где  $i$  – угол между нормалью к плоскости орбиты планеты и лучом зрения, как правило, неизвестный, а для транзитных планет – по массам  $m$ . Поэтому для сравнения распределение транзитных планет «Кеплера» по массам было преобразовано в их распределение по минимальным массам.

В диссертации отмечено (разд. 1.3), что анализ распределения известных экзопланет по массам и периодам во всем диапазоне параметров не встречается в литературе и выполнен впервые. Смею думать, что этот пробел вызван малой информативностью статистики, выведенной из разношерстной выборки всех известных планет. Свойства планет зависят от родительской звезды (ее массы, металличности) и наличия других планет, и именно эти зависимости представляют интерес для космогонии. Предположим, что завтра опубликуют 500 новых планет, открытых у звезд-гигантов. Статистика по всем известным планетам существенно изменится, но ничего нового мы из этого не извлечем. Кстати, выражение "усредненная структура планетных систем", употребляемое в диссертации, неудачно: усреднять можно лишь числовые величины, но не «структуру». Сравнение распределений транзитных и RV-планет корректно только для согласованных выборок родительских звезд. Разработанные в диссертации методы можно применить к избранным подмножествам экзопланет, и такой анализ для звезд солнечного типа был сделан.

Стандартный подход к верификации методов учета селекции - симуляция, когда метод тестируют на искусственной выборке с известными свойствами, искаженной селекцией. Это позволяет обнаруживать ошибки и почувствовать тонкости, не всегда очевидные. К сожалению, я не нашел в диссертации такой проверки.

Методы наблюдений экзопланет являются развитием методов наблюдений двойных звезд. Ввиду модности этой темы к ней подключились люди, не знакомые с литературой и историей. В результате им приходится подчас изобретать заново то, что уже известно. Например, рис. 9 в статье Tokovinin (2014, AJ, 147, 86) явно напоминает окно видимости.

В работе перепутаны термины "прямая" и "обратная" задача (раздел 4.1). Прямой задачей общепринято называть переход от истинного распределения к



Cerro Tololo Inter-American Observatory  
Community Science and Data Center  
Gemini Observatory  
Kitt Peak National Observatory  
Vera C. Rubin Observatory

noirlab.edu  
info@noirlab.edu

NOIRLab Headquarters  
950 North Cherry Avenue  
Tucson, Arizona 85719, USA  
+1 520 318 8000

NOIRLab Chile Base  
Recinto de AURA  
Avda. Juan Cisternas 1500  
La Serena, Chile  
+56 51 220 5200

NOIRLab Hawai'i Base  
670 N. A'ohoku Place  
Hilo, Hawai'i 96720, USA  
+1 808 974 2500

NOIRLab, the US center for ground-based optical-infrared astronomy, operates the international Gemini Observatory (a facility of NSF, NRC-Canada, ANID-Chile, MCTIC-Brazil, MINSYT-Argentina, and KASI-Republic of Korea), Kitt Peak National Observatory (KPNO), Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO), the Community Science and Data Center (CSDC), and the Vera C. Rubin Observatory. It is managed by the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) under a cooperative agreement with NSF and is headquartered in Tucson, Arizona.



наблюдаемому. Обратная задача - восстановление истинного распределения. Она, как правило, сводится к решению уравнения Фредгольма 2-го рода и является некорректной. Методы решения некорректных задач хорошо разработаны (например, регуляризация по Тихонову на классе гладких функций) и широко используются в самых разных областях. В применении к переходу от распределения минимальных масс к полным, цитируемая работа Чандрасекара, не учитывающая некорректность, безнадежно устарела. Итерационный метод решения именно этой задачи предложил L.Lucy (1974, AJ, 79, 745). Этот метод деконволюции, известный как метод Люси-Ричардсона, широко применялся при восстановлении изображений ввиду его простоты. Метод был переоткрыт заново в применении к двойным звездам (и экзопланетам) в работе T.Mazeh, D.Goldberg (1992, ApJ, 394, 592). В матричном виде некорректность обратной задачи соответствует обращению плохо обусловленной матрицы. Поиск гладких решений некорректных задач дает устойчивый к шуму результат. В качестве одного из сотен (если не тысяч) примеров - Tokovinin, Kiyeva (2018, MNRAS, 465, 2020, Appendix).

Еще более простой и популярный подход к обратным задачам - задание искомого распределения в параметрическом виде и подгонка параметров. При этом не нужно строить гистограммы, можно оперировать сырыми данными и явно учитывать селекцию. Как правило, примеряют метод максимального правдоподобия или его Байесовский аналог. Степенные распределения, например, могут быть получены таким способом. Параметризация уменьшает влияние слепых пятен, неявно экстраполируя модели на недоступную пока область параметров.

Статистика экзопланет - не самоцель, а средство для изучения их происхождения. Распределения, полученные в диссертации, сопоставлены с некоторыми предсказаниями популяционного синтеза. В будущем хотелось бы видеть следующий шаг - уточнение самих моделей. Возможно, команда, в которой работает диссертант, пока не обладает достаточной квалификацией в этой области. Наблюдения экзопланет в России тоже на нуле, так что развитие в области теории более реально. Подготовка квалифицированных кадров (чему служит и эта диссертация) - важный момент, и хорошо бы наметить план дальнейших исследований, чтобы укрепить это направление и поддержать мотивацию молодых ученых.

Несмотря на ряд замечаний, 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.



Cerro Tololo Inter-American Observatory  
Community Science and Data Center  
Gemini Observatory  
Kitt Peak National Observatory  
Vera C. Rubin Observatory

noirlab.edu  
info@noirlab.edu

NOIRLab Headquarters  
950 North Cherry Avenue  
Tucson, Arizona 85719, USA  
+1 520 318 8000

NOIRLab Chile Base  
Recinto de AURA  
Avda. Juan Cisternas 1500  
La Serena, Chile  
+56 51 220 5200

NOIRLab Hawai'i Base  
670 N. A'ohoku Place  
Hilo, Hawai'i 96720, USA  
+1 808 974 2500

NOIRLab, the US center for ground-based optical-infrared astronomy, operates the international Gemini Observatory (a facility of NSF, NRC-Canada, ANID-Chile, MCTIC-Brazil, MINCYT-Argentina, and KASI-Republic of Korea), Kitt Peak National Observatory (KPNO), Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO), the Community Science and Data Center (CSDC), and the Vera C. Rubin Observatory. It is managed by the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) under a cooperative agreement with NSF and is headquartered in Tucson, Arizona.

Работа хорошо оформлена. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Опубликованные в ведущих зарубежных и отечественных научных журналах результаты В.И. Ананьевой, также 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

Токовинин Андрей Аврельевич

доктор физико-математических наук

шифр специальности оппонента — 01.03.02

астроном Межамериканской обсерватории Серро-Тололо (Чили)

Межамериканская обсерватория Серро-Тололо, Ла-Серена (Чили)

Рабочий телефон +56 512205286

E-mail: [andrei.tokovinin@noirlab.edu](mailto:andrei.tokovinin@noirlab.edu)

9 сентября 2022 г.

I certify the signature of Dr. Andrey Tokovinin:

**Leonor Opazo, Administrative Assistant**



Перевод с английского языка на русский язык

**Перевод записи на ОТЗЫВЕ официального оппонента,  
доктора физико-математических наук Токовина Андрея Аврельевича,  
на диссертацию Ананьевой Владиславы Игоревны**

Я удостоверяю подпись Др. Андрея Токовина: *Подпись*

**Леонор Опазо, Помощник по административным вопросам**

Переводчик

Бородина Юлия Алексеевна

**Российская Федерация  
Город Москва.**

**Двадцать шестого сентября две тысячи двадцать второго года.**

Я, Кузнецова Дарья Сергеевна, временно исполняющая обязанности нотариуса города Москвы Булавиновой Аллы Павловны, свидетельствую подлинность подписи переводчика Бородиной Юлии Алексеевны.

Подпись сделана в моем присутствии.

Личность подписавшего документ установлена.

Зарегистрировано в реестре: № 77/725-н/77-2022-6-813

Уплачено за совершение нотариального действия: 400 руб. 00 коп.

Д.С. Кузнецова



*Handwritten signature of D.S. Kuznetsova*



Всего прошнуровано,  
пронумеровано и скреплено  
печатью 7 (семь)  
листов.

*Вот*

Нотариус 9

