

МЕТОД “ОКНА ВИДИМОСТИ” ДЛЯ УЧЕТА НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИИ В СТАТИСТИКЕ ЭКЗОПЛАНЕТ, ОТКРЫТЫХ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

© 2021 г. А. Е. Иванова^{1*}, О. Я. Яковлев¹, В. И. Ананьева¹,
И. А. Шашкова¹, А. В. Тавров¹, Ж.-Л. Берто²

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Лаборатория атмосферных и космических исследований, Гуйанкур, Франция

Поступила в редакцию 09.10.2020 г.

После доработки 20.11.2020 г.; принята к публикации 26.11.2020 г.

Предложен метод коррекции статистических данных по экзопланетам, открытым по измерениям лучевых скоростей. Исследованы статистические закономерности распределений экзопланет по их массам и по орбитальным периодам.

Ключевые слова: внесолнечные планеты, экзопланеты, наблюдательная селекция, метод лучевых скоростей, статистические распределения экзопланет.

DOI: 10.31857/S0320010821010058

ВВЕДЕНИЕ

Ключевой проблемой в построении статистики экзопланет и ее исследовании является неоднородность данных в архиве экзопланет¹. При рассмотрении статистики экзопланет, открытых методом лучевых скоростей, в качестве основных причин неоднородности следует выделить: разные чувствительности спектрографов, разные уровни активности родительских звезд, разные продолжительности наблюдений и разные методы обработки данных наблюдений.

Первые работы по изучению статистики экзопланет игнорировали неоднородность наблюдательных данных. Так, Батлер и др. (2006) построили распределение по проективным массам известных на тот момент 167 экзопланет и аппроксимировали его степенным законом $\frac{dN}{dm} \propto m^{-1.1}$, не принимая во внимание различия наблюдательных программ. Марси и др. (2005) попытались решить эту проблему, рассматривая только планеты, открытые в рамках наблюдений на обсерваториях Лик и Кек с помощью спектрографов с одинаковой инструментальной погрешностью единичного измерения 3 м/с, рассмотрев в итоге 104 планеты из 152, известных к тому моменту. Они нашли, что распределение следует степенному закону

$\frac{dN}{dm} \propto m^{-1}$. Камминг и др. (2008), рассматривая распределение планет с орбитальными периодами от 2 до 2000 сут и массами от 0.3 до 10 масс Юпитера, ввели “фактор полноты исследования” (completeness of the survey) и нашли, что распределение 182 RV-планет по массам и орбитальным периодам следует степенному закону вида $dN = CM^{-0.31 \pm 0.2} P^{0.26 \pm 0.1} d \ln M d \ln P$, где C — константа, M — проективная масса планеты, P — орбитальный период планеты, что соответствует распределению по проективным массам $\frac{dN}{dm} \propto m^{-1.31 \pm 0.2}$. Ховард и др. (2010), рассматривая распределение по массам планет, вращающихся вокруг 166 солнцеподобных звезд, наблюдавшихся на Кеке с помощью спектрографа HIRES, ввели “функцию полноты” (completeness function) $C(P, M)$ как долю звезд, гарантированно не имеющих рядом с собой планеты с данным периодом и проективной массой. Они нашли, что распределение планет с периодами короче 50 сут по проективным массам можно аппроксимировать степенным законом $\frac{dN}{d \log(m)} \propto m^{-0.48^{+0.12}_{-0.14}}$, которому соответствует закон $\frac{dN}{dm} \propto m^{-1.48^{+0.12}_{-0.14}}$.

Одним из подходов к учету неоднородности данных является метод “окна видимости”. В частности, этот метод был предложен в работах Ананьева и др. (2019) и Туоми и др. (2019). У Ананьевой и др. (2019) “окно видимости” — область на плоскости

* Электронный адрес: ctf.i.a.e@gmail.com

¹ <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

с координатами “проективная масса ($m \sin i$)” — “орбитальный период P ”: ($m \sin i, P$), в которой планета точно наблюдаема. Границы области определяют, учитывая три значения: (по оси “проективной массы”) нижнюю границу, соответствующую минимальной массе экзопланеты, которая может быть обнаружена наблюдательной программой; (по оси “орбитальных периодов”) левую границу, соответствующую орбитальному периоду гипотетической планеты, обращающейся на расстоянии трех радиусов родительской звезды и правую границу, соответствующую полному времени наблюдений данной звезды.

Такие “окна видимости” строятся для каждой звезды, рядом с которой была обнаружена хотя бы одна экзопланета, после чего происходит наложение “окон” друг на друга, чтобы обеспечить регуляризацию данных. Недостаток данного подхода заключается в том, что в общей статистике учитывают только планеты, которые попадают в область пересечения всех окон, т.е. которые могли быть обнаружены всеми наблюдательными программами. Таким образом, достаточно много экзопланет после регуляризации данных теряется.

В Туоми и др. (2019) была рассмотрена статистика экзопланет, число которых невелико, обращающихся вокруг звезд спектрального класса М. На первом шаге “окно видимости” в плоскости ($m \sin i, P$) строили аналогично Ананьевой и др. (2019). Но основным отличием было построение функции вероятности обнаружения. После этого по значению вероятности обнаружения и по количеству обнаруженных планет определяли распространенность планет разного типа и получали вероятностное “окно видимости”. Благодаря вероятностному подходу большее количество экзопланет учитывается, и статистические данные становятся более полными. Но данный анализ, как уже было упомянуто выше, был проведен только для планет у звезд спектрального класса М.

МЕТОД “ОКНА ВИДИМОСТИ” ДЛЯ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО МАССЕ И ПО ОРБИТАЛЬНЫМ ПЕРИОДАМ ЭКЗОПЛАНЕТ, ОТКРЫТЫХ МЕТОДОМ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

В настоящей работе рассматривались наблюдательные программы, обнаруживающие экзопланеты методом лучевых скоростей. Из различных сведений об экзопланете выбирали наиболее полные и последние по времени публикации, а также архивные данные, в которых указаны продолжительность наблюдений родительской звезды и среднее отклонение от оптимальной кеплеровской кривой.

Для вычисления границ окна видимости необходимо знать массы звезд M_{star} и массы планет M_{planet} , полное время наблюдения планетной системы T_{obs} и среднее отклонение от оптимальной кеплеровской кривой $\sigma(O - C)$. Также в модель “окна видимости” введены некоторые параметры для дополнительной настройки “прозрачности окна”.

Формула, описывающая формирование единичного “окна видимости”:

$$\begin{cases} P_{\text{planet}} \leq \Delta T_{\text{obs}}, & (1a) \\ 203.25 M_{\text{planet}} M_{\text{star}}^{-\frac{2}{3}} P_{\text{planet}}^{-\frac{1}{3}} \geq \gamma \sigma(O - C), & (1b) \end{cases}$$

где P_{planet} — период обращения планеты, Δ — параметр модели, T_{obs} — продолжительность наблюдения родительской звезды, 203.25 — числовой коэффициент, учитывающий период планеты в единицах суток, массу планеты в ед. масс Юпитера и массу звезды в единицах масс Солнца, M_{planet} — масса планеты, M_{star} — масса родительской звезды, γ — параметр модели, $\sigma(O - C)$ — среднее отклонение от оптимальной кеплеровской кривой.

Поскольку к настоящему времени уже известно несколько планет, обращающихся ближе трех звездных радиусов (например, *Kepler - 78b*, *K2 - 141b*, *WASP - 103b* и т.д.), в настоящей работе граница окна видимости со стороны малых периодов отсутствует.

Первое неравенство (1a) показывает, что планета наблюдаема, если она прошла некоторую часть полного оборота вокруг звезды за время наблюдения. Современные методики способны обнаруживать экзопланеты, прошедшие как минимум половину одного витка, т.е. $\Delta = 2$. Так, из рассматриваемых 695 RV-экзопланет только у 10 (менее 1.5%) отношение орбитального периода к полному времени наблюдения превышало 2.

Неравенство (1b) составлено на основании Эггенбергер и Удри (2010). Оно показывает условие, что планета считается детектируемой, если полуамплитуда колебаний лучевой скорости звезды (обозначаемой K), наведенная экзопланетой, больше, чем доля (определяемая коэффициентом γ) среднего отклонения от оптимальной кеплеровской кривой ($\sigma(O - C)$). В данной работе коэффициент γ был принят равным 0.75. Однако следует отметить, что коэффициент γ изменяется для разных массовых интервалов. Так, для интервала от 0.011 до 0.1 масс Юпитера $\gamma = 0.75$, поскольку из 145 планет у 28 отношение полуамплитуды колебаний лучевой скорости K к среднему отклонению σ меньше единицы. В диапазоне масс от 0.135 до 1.23 масс Юпитера только у одной планеты отношение K/σ меньше 1, для всех остальных оно больше 1.19, для анализа данного

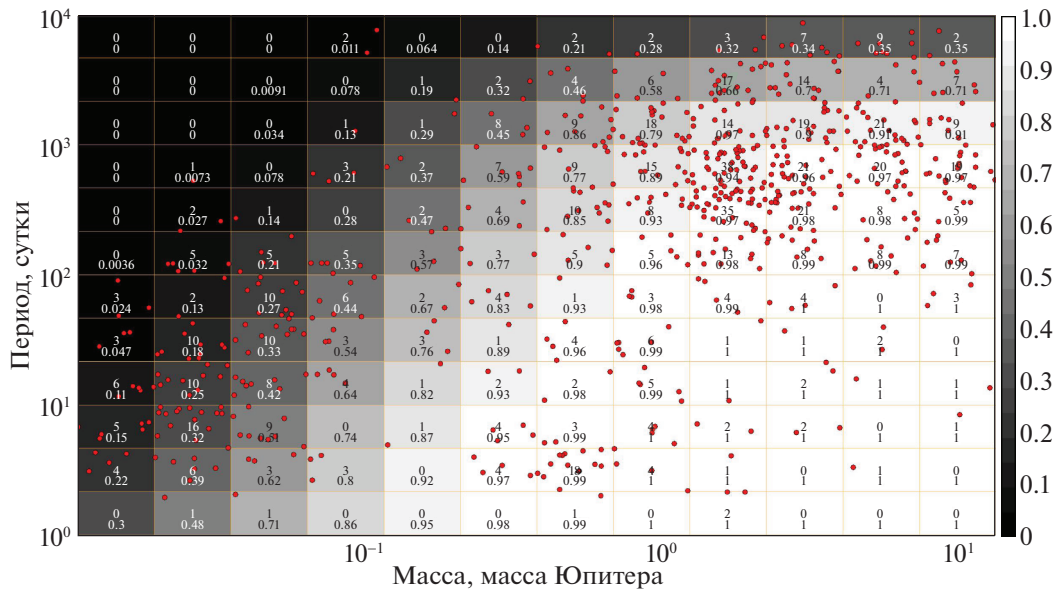


Рис. 1. Пример окна видимости. По оси абсцисс — проективная масса экзопланеты в массах Юпитера, по оси ординат — орбитальный период в сутках. В каждой ячейке верхнее число — количество обнаруженных экзопланет, нижнее число — вероятность обнаружения. Оттенки серого демонстрируют вероятность. Красными точками показаны известные RV-планеты.

диапазона нами был принят коэффициент $\gamma = 1.18$. В диапазоне масс от 2.22 до 13 масс Юпитера коэффициент γ возрастает и становится равным двум.

Так как наибольший интерес для исследования представляли планеты малых масс, то коэффициент γ , который был использован при анализе, описываемом в данной публикации, был принят равным 0.75.

Для статистического исследования нами была рассмотрена область масс от 0.011 до 13 масс Юпитера и область орбитальных периодов от 1 до 10 000 сут. Оба диапазона были разделены на 12 интервалов, равных в логарифмическом масштабе, таким образом, “окно видимости” плоскости $(m \sin i, P)$ разделено на 144 ячейки. Для построения “окна видимости” полагали модельные экзопланеты со значениями массы и орбитального периода, равными значениям в середине каждой из 144 ячеек. Если модельная экзопланета удовлетворяла выражениям (1а) и (1б), то значение в соответствующей ячейке увеличивалось на единицу, и алгоритм переходил к рассмотрению следующей родительской звезды из тех, рядом с которыми были обнаружены экзопланеты, всего 551 звезда. После того, как наблюдения всех родительских звезд были рассмотрены, получившуюся матрицу нормировали на количество обзоров (551 звезду), и значения в ячейках матрицы принимали значение от 0 до 1, соответствующие вероятности обнаружения, где 0 — абсолютно непрозрачное окно (планету невозможно обнаружить), а 1 — абсолютно

прозрачное (планета будет обнаружена всеми обзорами).

Пример построенного окна видимости показан на рис. 1.

Для учета наблюдательной селекции в нескорректированных распределениях (гистограммах), по массам или по периодам, полученным непосредственно из данных Архива, каждую планету на плоскости $(m \sin i, P)$, показанную красной точкой, учитывали со статистическим весом, обратным значению вероятности в аналогичной ячейке окна видимости. Тем самым корректируется исходное распределение, и компенсируется неполнота данных в областях, где экзопланеты наблюдаемы с меньшей вероятностью.

Необходимо отметить, что в некоторых участках плоскости $(m \sin i, P)$ вероятность обнаружения экзопланет равна нулю. Эта область, образующая “слепое пятно” (рис. 1, левый верхний угол), охватывает планеты малых масс и больших орбитальных периодов. Наличие “слепого пятна” необходимо учитывать, так как эта область является областью неопределенности. При этом видимое отсутствие массивных планет с короткими орбитальными периодами (рис. 1, правый нижний угол) объясняется не наблюдательной селекцией (напротив, такие планеты обнаружить легче всего), а их реальной крайней редкостью.

В данной работе мы обходим область неопределенности, “слепое пятно”, двумя способами: рассматриваем или только экзопланеты всех масс с

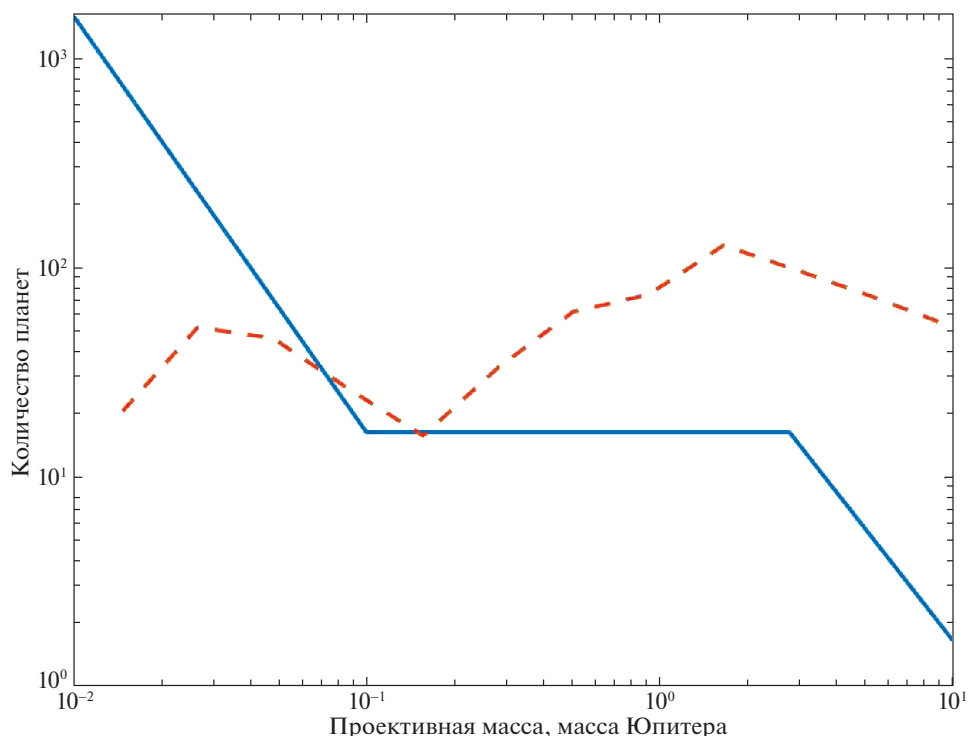


Рис. 2. Сравнение нескорректированного распределения по массам экзопланет с теоретическим распределением. Нескорректированное распределение по массам 695 RV-экзопланет показано красным цветом (пунктирная линия). Теоретическое распределение, полученное методом популяционного синтеза Мордасини (2018), показано синим цветом (сплошная линия).

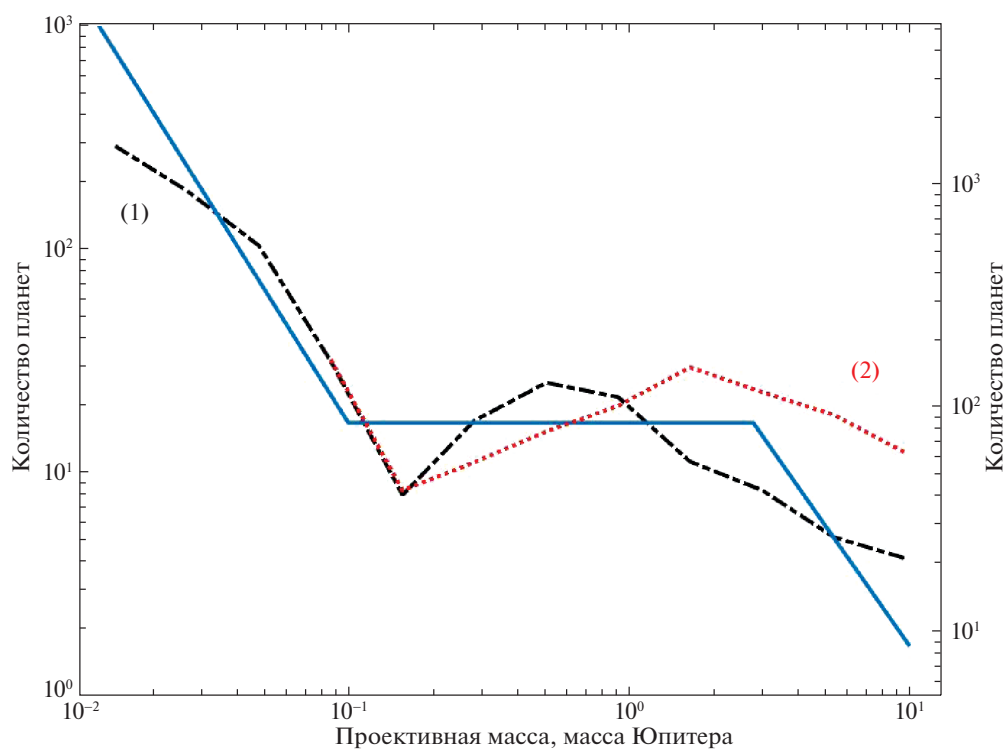


Рис. 3. Сравнение скорректированных распределений по массам экзопланет с теоретическим распределением. Скорректированное распределение 695 экзопланет: черная штрихпунктирная кривая (1) показывает распределение планет всех масс с орбитальными периодами от 1 до 100 сут, красная пунктирная кривая (2) показывает распределение планет всех орбитальных периодов с массами свыше 0.06 масс Юпитера. По оси абсцисс — проективная масса в массах Юпитера, по оси ординат слева — количество экзопланет, соответствующих кривой (1) (показана черным цветом), по оси ординат справа — количество планет, соответствующих кривой (2) (показана красным цветом). Синяя сплошная линия — теоретическое распределение, полученное методом популяционного синтеза Мордасини (2018).

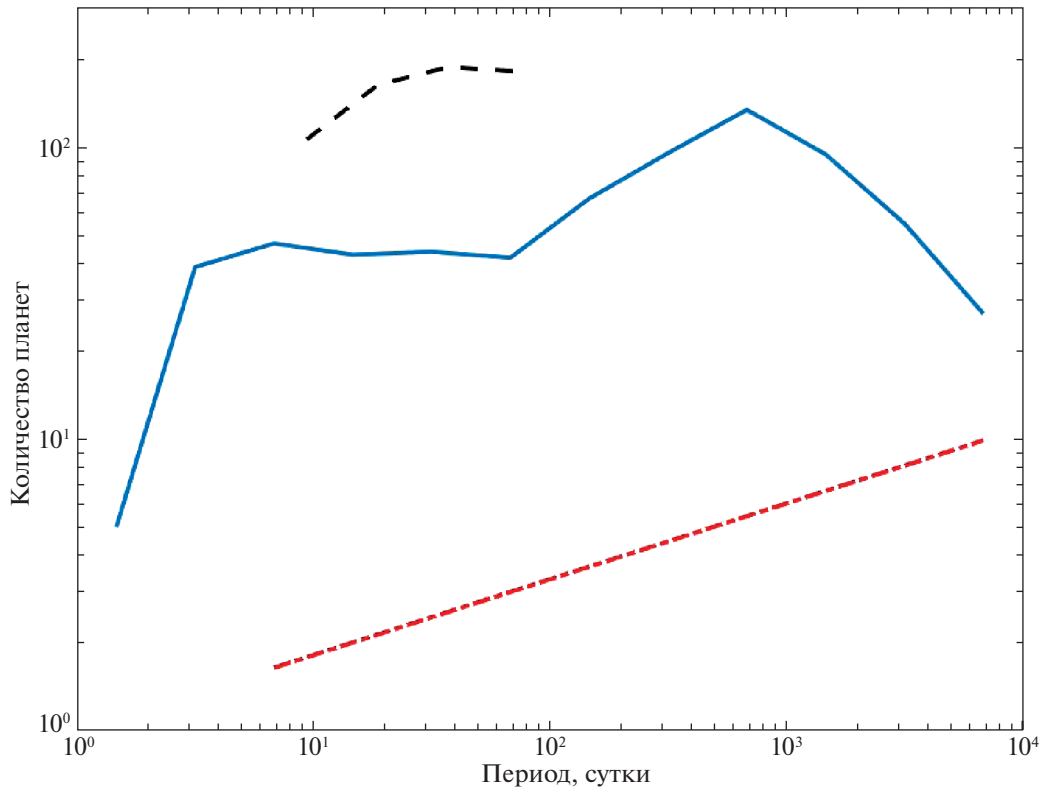


Рис. 4. Сравнение нескорректированного распределения по периодам экзопланет с ранее опубликованными распределениями. Нескорректированное распределение по периодам 695 RV-экзопланет показано синей сплошной линией. Распределение, опубликованное в Петитюра и др. (2013), показано черной пунктирной линией. Распределение, опубликованное в Камминг и др. (2008), показано красной штрихпунктирной линией. Представленные кривые искусственно разнесены по оси ординат для наглядности (“масштабный” коэффициент может быть выбран произвольно).

периодами от 1 до 100 сут, или экзопланеты всех периодов с массами от 0.06 до 13 масс Юпитера.

Нескорректированное распределение экзопланет по их массам показано на рис. 2, а результат коррекции с применением “окна видимости” — на рис. 3. Также на рис. 2 и 3 показано теоретическое распределение Мордасини (2018), с которым мы сравниваем наблюдаемое распределение до и после коррекции. До коррекции наблюдаемое и теоретическое распределения имеют наглядное несоответствие, а после коррекции два распределения (в результате обхода области неопределенности) стремятся к теоретическому распределению.

Для сравнения полученных распределений (рис. 2–5) с опубликованными ранее работами (Мордасини, 2018; Камминг и др., 2008; Петитюра и др., 2013) мы приняли во внимание, что представленные этими авторами распределения нормированы на одну звезду (являются частотами распространенности, occurrence rate). Без потери общности они могут быть умножены на любое число, что в логарифмическом масштабе соответствует произвольному вертикальному сдвигу.

Аналогично распределению по массам до коррекции и после, можно получить распределения эк-

зопланет по орбитальным периодам и сравнить их с опубликованными распределениями. Нескорректированное распределение по периодам показано на рис. 4 в сравнении с распределением транзитных планет “Кеплера”, опубликованным в Петитюра и др. (2013), и распределением из Камминг и др. (2008).

Аналогично распределениям по массам, распределение экзопланет по периодам после коррекции необходимо разделить для рассмотрения на две группы:

1. Экзопланеты с массами от 0.011 до 13 масс Юпитера и периодами от 1 до 100 сут.
2. Экзопланеты с массами от 0.06 до 13 масс Юпитера и периодами от 1 до 10 000 сут.

Скорректированные распределения показаны на рис. 5 вместе с распределениями, опубликованными в Петитюра и др. (2013) и Камминг и др. (2008).

Нескорректированное распределение экзопланет по их периодам показано на рис. 4, а результат коррекции с применением “окна видимости” — на

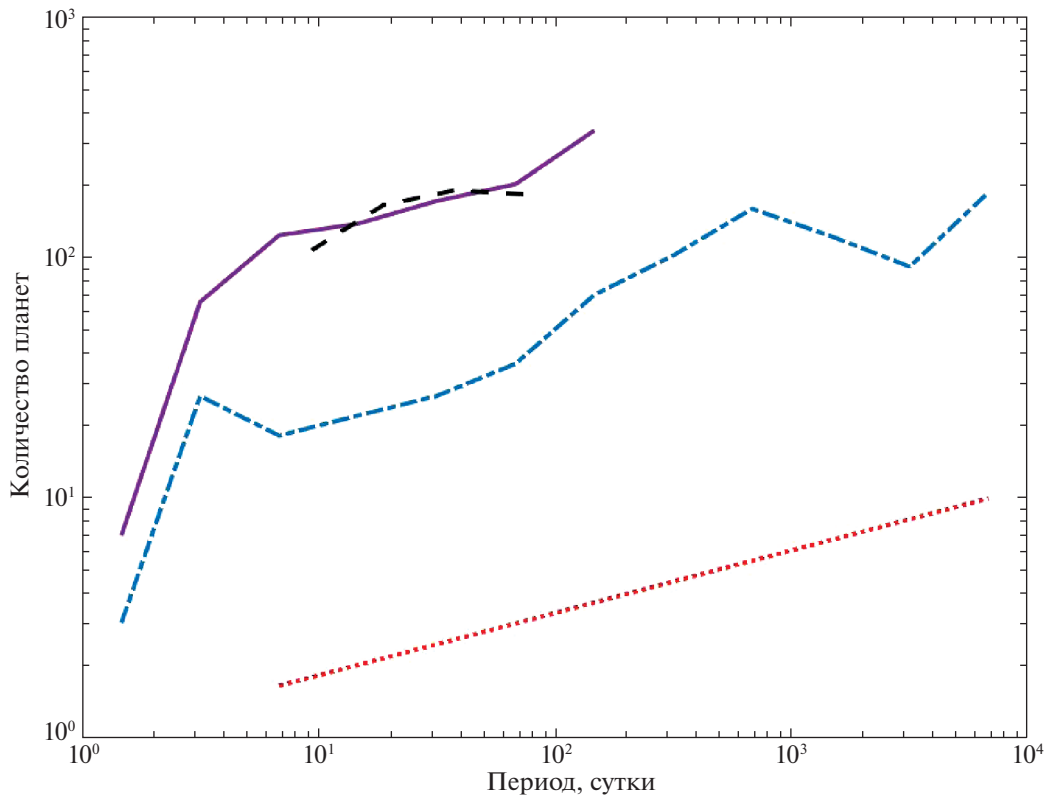


Рис. 5. Сравнение скорректированных распределений по периодам экзопланет с ранее опубликованными распределениями Петигура и др. (2013) и Камминг и др. (2008). Фиолетовая сплошная кривая — скорректированное распределение экзопланет с массами от 0.011 до 13 масс Юпитера и периодами от 1 до 100 сут, голубая штрихпунктирная кривая — скорректированное распределение экзопланет с массами от 0.06 до 13 масс Юпитера и периодами от 1 до 10000 сут. По оси абсцисс — период обращения планеты в земных сутках, по осям ординат — количество экзопланет. Черная пунктирная линия — распределение транзитных планет “Кеплера”, опубликованное в Петигура и др. (2013). Линия из красных точек — распределение из Камминг и др. (2008).

рис. 5. Также на рис. 5 показаны ранее опубликованные распределения в Петигура и др. (2013) и Камминг и др. (2008), с которыми мы сравниваем наблюдаемое распределение до и после коррекции. До коррекции наблюдаемое и ранее опубликованные распределения имеют наглядное несоответствие, а после коррекции два распределения (в результате обхода области неопределенности) становятся более схожи с ранее опубликованными.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработан вероятностный метод “окна видимости” для регуляризации статистики экзопланет, открытых методом лучевых скоростей. Описан алгоритм построения окна, а также проанализирован результат его применения к существующей статистике. Проведено сравнение с ранее опубликованными результатами.

Распределение планет по проективным массам следует кусочному степенному закону с изломами в точках ~ 0.135 и ~ 2 масс Юпитера и находится в согласии с предсказанием теории популяционного

синтеза Мордасини (2018). Распределение планет с проективными массами от 0.011 до 13 масс Юпитера и орбитальными периодами от 1 до 100 сут по форме отличается от распределения планет от 0.06 до 13 масс Юпитера и периодами от 1 до 10^4 сут — большинство планет тяжелее Юпитера находятся на широких орбитах с периодами больше 100 сут. Распределение планет по орбитальным периодам демонстрирует примерно десятикратный рост при переходе от интервала 1–2.15 сут к интервалу 2.15–4.64 сут (это справедливо для планет и малых, и больших масс), а в дальнейшем следует степенному закону с показателем степени 0.26 в соответствии с Камминг и др. (2008): $\frac{dN}{d \log P} \propto P^{0.26}$. Форма распределения экзопланет по орбитальным периодам в интервале 6.25–100 сут близка к аналогичному распределению транзитных планет “Кеплера” с радиусами от 1 до 22 радиусов Земли (Петигура и др., 2013).

Авторы благодарят правительство Российской Федерации и Министерство высшего образования

и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьева и др. (V.I. Ananyeva, A.A. Venkstern, D.V. Churbanov, I.A. Shashkova, A.V. Tavrov, O.I. Korablev, and J.-L. Bertaux), *Solar System Res.* **53**, 124137 (2019).
2. Батлер и др. (R.T. Butler, J.T. Wright, G.W. Marcy, D.A. Fischer, S.S. Vogt, C.G. Tinney, H.R.A. Jones, B.D. Carter, J.A. Johnson, C. McCarthy, and A.J. Penny), *Astrophys. J.* **646**, No. 1 (2006).
3. Камминг и др. (A. Cumming, R.P. Butler, G.W. Marcy, S.S. Vogt, J.T. Wright, and D.A. Fischer), *Proceed. Astron. Soc. Pacific* **120** (867), 531 (2008); doi:10.1086/588487
4. Марси и др. (G. Marcy, R.P. Butler, D. Fischer, S. Vogt, J.T. Wright, C.G. Tinney, and H. R.A. Jones), *Progress Theor.Phys. Suppl.* **158**, 24 (2005).
5. Мордасини (C. Mordasini), *Planetary Population Synthesis, Handbook of Exoplanets* (Ed. H.J. Deeg, J.A. Belmonte, 2018); https://doi.org/10.1007/978-3-319-30648-3_143-1
6. Петигура и др. (E.A. Petigura, A.W. Howard, and G.W. Marcy), *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **110** (48), 19273 (2013); doi:10.1073/pnas.1319909110
7. Туоми и др. (M. Tuomi, H.R.A. Jones, R.P. Butler, P. Arriagada, S.S. Vogt, J. Burt, G. Laughlin, B. Holden, et al.), *Frequency of planets orbiting M dwarfs in the Solar neighbourhood* (2019); <https://arxiv.org/pdf/1906.04644.pdf>
8. Ховард и др. (A.W. Howard, G.W. Marcy, J.A. Johnson, D.A. Fischer, J.T. Wright, H. Isaacson, J.A. Valenti, J. Anderson, D.N.C. Lin, and S. Ida), *Science* **330** (6004), 653 (2010); <https://doi.org/10.1126/science.1194854>
9. Эггенбергер, Удри (A. Eggenberger and S. Udry), *EAS Publ. Ser.* **41**, 27 (2010).