

## Звездная активность, маскирующая под планеты Обитаемая зона Мкарлика Глизе 581

Пол Робертсон<sup>1,2</sup>, Суврат Махадеван<sup>1,2,3</sup>, Майкл Эндл<sup>4</sup>, Арпита Рой<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Кафедра астрономии и астрофизики Пенсильванского государственного университета

<sup>2</sup>Центр экзопланет и обитаемых миров, Университет штата Пенсильвания

<sup>3</sup>Центр астробиологических исследований штата Пенсильвания, Университет штата Пенсильвания.

<sup>4</sup>Обсерватория Макдональда, Техасский университет в Остине

Считается, что карлика МГлизе 581 находится четыре планеты, в том числе одна (GJ

581d) вблизи обитаемой зоны, которая могла бы поддерживать жидкую воду на своей территории.

поверхности, если это каменная планета. Обнаружение еще одной планеты обитаемой зоны –

GJ 581g – оспаривается, так как его значение зависит от предполагаемого эксцентриситета.

Для анализа звездной активности по линии Na, мы измерили вращение звезды.

период  $130 \pm 2$  дня и корреляция модуляции Na с радиальной

скоростью. Поправка на активность значительно снижает сигнал GJ 581d (до

1,5 $\sigma$ ), одновременно значительно усиливая сигналы другой известной суперземли.

планеты. GJ 581d не существует, но является артефактом звездной активности, который,

при неполной коррекции приводит к ложному обнаружению планеты g.

Считается, что на расстоянии 6,3 парсека у Мкарлика Глизе 581 (GJ 581) находится система  
планеты, открытые с помощью метода доплеровской лучевой скорости (RV) (1–3) и диска обломков (4).

Считается локальным аналогом компактных карликовых планетных систем M, обнаруженных телескопом Кеплер.

космический корабль (5, 6).

arXiv:1407.1049v1

А периоды и параметры орбит внутренних планет b ( $P = 5,36$  суток) и c ( $P = 12,91$  дня) не изменились с момента их первоначального открытия (1, 2), период планеты d составил пересмотрен с 82 до 66 дней (2, 3) после открытия четвертой планеты e ( $P = 3,15$  дня).

Поскольку точности данных спектрографов HARPS и HIRES планеты f ( $P = 433$  дней) и g ( $P = 36,5$  дней) сообщалось (7), и их существование сразу же подверглось сомнению (8) используя дополнительные данные HARPS. Хотя в настоящее время считается, что указанная планета f не существует, некоторые группы до сих пор заявляют о существовании планеты g. (9) свидетельствует в пользу круговой модели с 5 планетами (включая g) на основе динамической устойчивости, тогда как исследования, основанные на байесовской статистике (10), и коррелированный шум (11, 12) не находят доказательств существования g. Примерно в половине периода от d его сигнал RV сильно зависит от эксцентриситета, предполагая соответствие планете d (9, 13).

Сама планета d подверглась сомнению анализом с использованием модели коррелированного шума (11) с низким значением для  $2\sigma$ , хотя сообщество все еще широко верит в d. Глизе 581

Система также представляет большой интерес, поскольку все три планеты (c, d, g) рассматривались в однажды оказаться в числе первых экзопланет, которые могли бы иметь обитаемую среду, если бы они были Rocky (2, 7, 14, 15), причем d по-прежнему считается отличным кандидатом. Эта система продолжает подлежать интенсивному изучению (например, (16)). Поскольку звездная активность является важным источником шума на амплитуды RV планет GJ 581, здесь мы стремимся исследовать эффекты звездной активности.

о автомобилях GJ 581 подробнее.

Наш анализ корреляции между КА и показателями звездной активности сосредоточен на общедоступных спектрах спектрографа HARPS1. Мы приняли новейшие опубликованные HARPS RV (8) и измеренные показатели активности для Na (IHa) (17) и Na ID (ID) (18) линии с помощью спектров. Использование функций взаимной корреляции (CCF), включенных в HARPS. спектров мы также рассматривали обратные наклоны бисектрисы (BIS). Мы включили один спектр из нашего анализа, поскольку это, скорее всего, всыпка. Визуальный контроль спектров

---

<sup>1</sup> На основе данных, полученных из Научного архива ESO по запросу № 58160.

показывает, что ID загрязнен сильными линиями излучения натрия в ночном небе, которые трудно обнаружить.

правильно без небесных волокон. Поэтому мы ограничили наш анализ RV значением  $\ln a$ , чтобы минимизировать ошибку.

В спутниках GJ 581 доминирует сигнал планеты b. После удаления этой доминанты сигнала мы обнаруживаем значительную антикорреляцию скачков RV с  $\ln a$ . Для всего набора данных (239 спектров), коэффициент корреляции Пирсона  $r = -0,31$  (вероятность отсутствия корреляции  $P(r) = 5 \times 10^{-7}$ ). Исследуя BIS для данных HARPS, мы также видим свидетельства корреляции ( $r = 0,44$  за наиболее активный период) между BIS и  $\ln a$ , как и следовало ожидать, если бы звездная активность являлась причиной некоторых движений правого желудка для GJ 581 (рис. S10).

Частотный анализ индексов активности показывает, что их изменчивость – и, следовательно, вызванный сигнал RV – связан с вращением звезды (рис. S1). Периодogramма  $\ln a$  показывает сильный пик на 125-й день и дополнительный пик на 138-й день, вызванный фазовыми изменениями в сигнале вращения. Наилучшее соответствие данным временных рядов  $\ln a$  получается, когда мы моделируем отдельные синусоиды к периодам с декабря 2005 г. по сентябрь 2007 г. и с января 2010 г. по июль 2011 г., когда CO  $\ln a$  в два раза выше, чем в периоды «затишья» в 2005 и 2009 гг. Синусоидальные модели дают средний период вращения  $130 \pm 2$  суток, а фазовые и (до меньшей степени) амплитуда варьируется.

Изменение фазы и амплитуды сигнала вращения звезды, вызванное активностью вызывает переменное влияние на ГЖ, подразумевая, что наклон корреляции активности ГЖ не является строго постоянным. Вместо того, чтобы оценивать корреляцию активности правого желудка как соответствующую ее набору данных, мы исследовали RV как функцию  $\ln a$  в течение каждого сезона наблюдений в архиве HARPS. Для роки с декабря 2005 г. по сентябрь 2007 г. и с января 2010 г. по июль 2011 г. мы установили, объединил два сезона, поскольку  $\ln a$  показывает последовательный сигнал вращения в разные сезоны, что позволяет предположить, что поведение активности остается примерно постоянным в течение этого времени.

Мы обнаруживаем значительные антикорреляции RV- $\ln a$  ( $r = -0,45, -0,55, -0,48$ ) для трех эпох. Эти три эпохи имеют среднеквадратические значения  $1,22 \times 10^{-3}$ ,  $1,10 \times 10^{-3}$  и  $1,31 \times 10^{-3}$  дм/с.

$I_{H\alpha}$ , в отличие от  $RMSI_{H\alpha} = 4,81 \times 10^{-4}$ ,  $4,19 \times 10^{-4}$  в другие сезоны, что указывает на звезду.

в это время примерно в два раза активнее. Хотя мы удалили планеты b, c и e

из RV мы обнаруживаем, что после удаления планеты b коэффициенты корреляции не меняются.

значительно измениться до/после удаления c и e. Антикорреляция особенно очевидна

на сезон 2010 года показано на рисунке 1.

Мы корректируем RV HARPS, вычитая наиболее подходящее соотношение RV- $I_{H\alpha}$  из каждого из трех эпох, для которых мы наблюдали значительную антикорреляцию остальных эпох и неизменными. Затем новую модель RV можно использовать для оценки влияния коррекции активности на известные экзопланеты и определить, существуют ли какие-либо дополнительные сигналы. Обнаруживаем известные планеты b, c и e с использованием обобщенной периодограммы Ломба-Скаргла (19) (рис. 2). Для планет c и e мы наблюдаем значительное увеличение мощности сигнала после поправки на активность. Сила планеты c увеличивается с 53,5 до 57,6, а мощность увеличивается с 23,5 до 30,3. Формально, тревога и Ломба-Скаргла (FAP, из (11)) масштабируется примерно как  $\frac{P}{P}$  для вероятности ложной периодограммы с мощностью P, таким образом, увеличение мощности приводит к уменьшению FAP в раз. 60 для планеты c и 800 для планеты e.

Напротив, сила планеты d падает с 31,4 до 11,6 после того, как мы применили нашу коррекцию активности. Как показано на рисунке 1, мощность периодограммы увеличивается, как это было бы у планеты в периоды высокой активности, но снижается в эпоху с самым низким  $RMSI_{H\alpha}$ . Планета d сообщила период в 66 дней, что примерно равно половине периода вращения звезды, что позволяет предположить, что это гармоника, которая теряет значение при удалении сигнала вращения путем декорреляции с  $I_{H\alpha}$ .

В таблице 1 мы перечисляем параметры нашей трехпланетной модели для HARPS с поправкой на активность. Дома на колесах. Мы подгоняем автодом с помощью прогамных пакетов GaussFit (20) и SYSTEMIC (21), нах орая х орошее согласие между ними. Наша модель мало чем отличается от предыдущих подгонок планет. b, c и e (3, 8, 9), за исключением того, что планета e больше не демонстрирует никакого эксцентриситета после активности коррекция. В скорректированных RV сигнал 66-дневного периода выявляется только на уровне значимости  $1,5\sigma$ .

наос таточной периодог рамме, ас иг нал 33/36 дней вообще не поя вля етс я . Мы заключаем

Решение отрех планетах с изменчивос тью вызванной активнос тью полнос тьюобъя с ня ет наблюдени я .

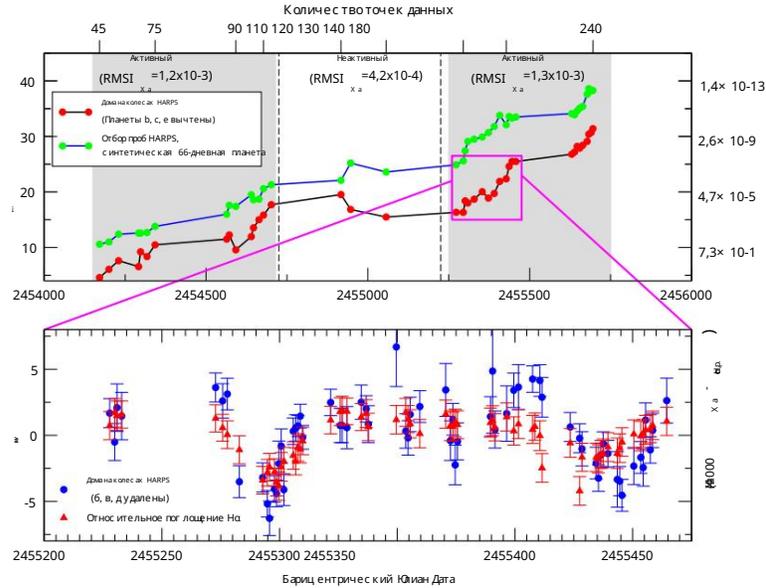


Рис унок 1: Вверх у: с тепеь периодог раммы d как функц ия време ни и количес тва RV HARPS. мощнос ть с общаетс я через кажды е 5 наблюдени я. Мы показываем реальные с путники пос ле удалени я планет b, c, и e (черный/крас ный), атакже кеплеровс кий сиг нал экс ц ентричес кой 66-дневной планеты, отобранн ый с помощью временны е метки и неопределеннос ти выборки HARPS (синий/зеленый). Качес твенные уровни звездная активнос ть, рас с читанная по индекс у IHa, показана для разных периодов време ни. Внизу: APФЫ Дома на колес ах (синие) для рег иона, обведенно г о розовым. Планеты b, c и e были с моделированы и удалены. из автофург онов. Мы накладываем наш индекс H $\alpha$  (крас ный), мас штабированный для облег чени я визуальн о с равнени я . P.V. и H $\alpha$  с ильно коррелиру ют, что указывае т на то, что ос тавшийс я доплеровс кий сиг нал вызван звездной активнос тью

Мы утверждаем, что периодический сигнал RV на 66-й день явля етс я арте фактом, вызванны м вращени ем звезды.

а не экзопланета. Предыду щие ис следовани я (3, 7) не учитывали вращательны е моду ли, вызванны е звездными п я тнами.

Считае тс я , что это я вля етс я источник о с иг налов RV, с соответс твующи х планетам d и g, пос кольку низкие фотометричес кие переменнос ть звезды предпола гает, что лкбые прис утс твующи е п я тна должны быть с лишком маленькими, чтобы с оздать наблюдае мое с иг налы. Однако наблюда лос ь влия ни е прос транс твенно локализованной маг нитной активнос ти на RV.

Звезды M без п я тен с выс ким оптичес ким контраст ом. Поразительное с х одс тв о с ущес твует с нашим

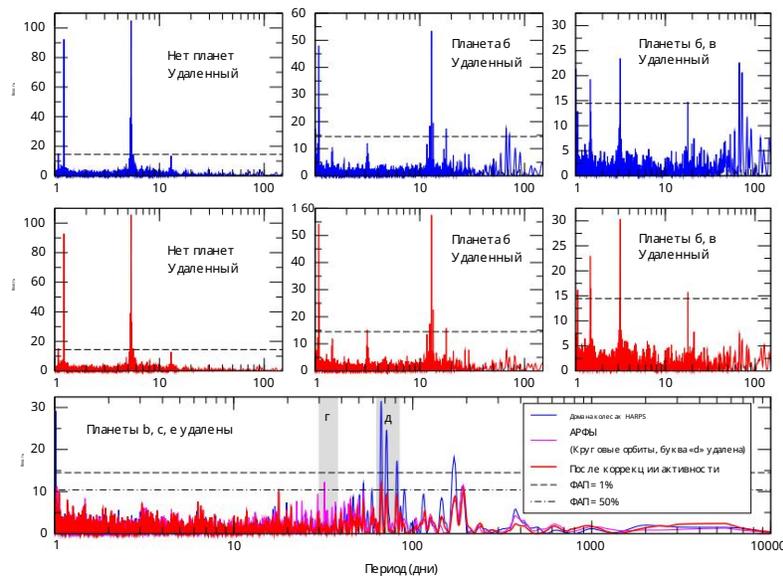


Рисунок 2: Периодограмма для RV HARPS до (синий) и после (красный) поправки на звездную активность, при этом планеты последовательно вычитаются. На нижней панели мы также показываем (розовый) периодограмму после вычитания четырех круговых кеплеровских сигналов, показывающую, что сигнал интерпретированный как 581 г (7, 9), было вызвано подгонкой с инусом удаленного сигнала к сигналу 581d и отсутствием, по сути, неполную поправку на звездную активность.

наблюдаемые результаты корреляции активности и RV для GJ 581 и данные, полученные для звезды Барнарда, медленно вращающейся, фотометрически тихий Мкарлик аналогичного спектрального класса. Наблюдения с помощью UVES Спектрограф обнаружил значение антикорреляции RV-Инд  $r = -0,498$ , практически идентичное наблюдаемому.

служил здесь (22). Курс термодинамики приписывает это влияние магнитноактивным областям, которые стимулируют излучение H $\alpha$ , но не создают высококонтрастных пятен. Эти регионы препятствуют местному конвекции, приводя к смещению ГВ. Доказательства связи между хромосферной активностью и H $\alpha$  эмиссией и подавление конвекции также наблюдались в виде температуры/радиуса зависимость от активности H $\alpha$  для звезд малой массы (23). Антикорреляция (т.е. отрицательный наклон) для RV по сравнению с Инд предполагает, что звездные линии, используемые для определения RV, излучаются из области конвективного перергулирования.

Орбитальный параметр	Планета b	Планета c	Планета e
Период P (дни)	5,3686 ± 0,0001	12,914 ± 0,002	3,1490 ± 0,0002
Периастральный прох од TO (БЖД - 2 450 000)	4751,76 ± 0,01	4759,2 ± 0,1	4752,33 ± 0,05
Амплитуда RV K (м/с)	12,6 ± 0,2	3,3 ± 0,2	1,7 ± 0,2
Эксцентриситет e	0,00 ± 0,03	0,00 ± 0,06	0,00 ± 0,06
Большая полуось a (AU)	0,04061 ± 0,00003	0,0721 ± 0,0003	0,02815 ± 0,00006
Минимальная масса M sin i (M <sub>J</sub> )	15,8 ± 0,3	5,5 ± 0,3	1,7 ± 0,2
Смещение нулевой точки RV (м/с)	-0,52 ± 0,1		
Среднеквадратичное значение (м/с)	2.12		

Таблица 1: Орбитальное решение планет GJ 581 после поправки на звездную активность.

Хотя наблюдаемый нами RV, вызванный активностью может быть не следствием «типичных» темных звездных пятен, каллизованные вращающиеся области, которые магнитно изменяют поле конвективных скоростей, создадут RV подписи, эквивалентные пятнам. В отсутствие одновременного высокоточного фотометрического мониторинга учитывая это, трудно определить относительный вклад этих различных механизмов. Мы поэтому в дальнейшем именуем их активными областями (AR). Одно вращающееся звездное пятно создает сигнал RV в период вращения и подает мощность на ряд гармоник, в первую очередь Прот/2, Прот/3 и Прот/4 (24). В целях изучения качественного воздействия таких AR на автофургане, модели звездного пятна должно быть достаточно. При периоде ротации 130 дней детально индуцированный сигнал RV всегда имеет значительную мощность вблизи периода планеты d. Мы представляем две гипотезы отсутствия наблюдаемого сигнала на периодogramме около 130 дней. Одно объяснение кроется в геометрии звезды и ее АО. Форма ПЖ, вызванной активностью сигнала меняется в зависимости от наклона звезды и широты АО, иногда перевод мощности RV из периода вращения в его гармоники. В качестве иллюстрации в анализе с использованием кода SOAP (24) (рис. S7) для наклона звезды 50° (последовательность палатку с диском обломков (4)) и пятна вблизи звездного экватора, то КА индуцированные пятнами, доминирует 66-дневный сигнал. Однако более важным фактором является то, что в 2010-2011 гг.

В эпоху наблюдений активность На содержит два сигнала примерно равной мощности: 128 и 69.

дней, что указывает на наличие двух AR вместо одного. В эту эпоху мы находим (рис. 54)

Корреляция активности-RV определяется 69-дневным сигналом, а не периодом вращения, что указывает на активность, заключающуюся в подаче мощности ПЖ за половину периода вращения при наличии двух AR. Дополнение-

Изменение мощности на половине периода вращения для 109 из 240 наблюдений объясняет доминирование

сигнала Prot /2.

Наш анализ активности также помогает объяснить, почему сигнал, приписываемый планете d, не наблюдается.

Только в автофургонах Keck/HIRES (11). Мы рассчитали ИИ для спектров HIRES, которые мы

показаны рядом с измерениями HARPS на рисунке 3. Данные HIRES охватывают только последние

части активной фазы с декабря 2005 г. по сентябрь 2007 г. и имеют очень небольшую ошибку

в 2010-2011 гг., когда два AR управляют 66-дневным периодом. В сочетании с более высокой общей ошибкой

баров HIRES по сравнению с HARPS, это приводит к тому, что 66-дневный сигнал не обнаруживается.

Сигнал 33- или 36-дневной «планеты g», о существовании которой уже говорилось.

под вопросом, также является артефактом вращения звезд, поскольку после активности не остается и намека на него.

коррекция. Близко к  $P = Prot/4$  – это еще одна гармоника периода вращения. Кроме того,

сигнал наблюдается только при установке круговой орбиты на «планету d», как показано на нижней панели.

рисунка 2 (7-9). Подгоняя круговую модель к 66-дневному сигналу, (7) по существу

произвели неполную коррекцию звездной активности, а сигнал «планеты g» был просто

оставшийся шум, созданный звездной активностью

Влияние звездной активности на систему GJ 581 демонстрирует решающую важность

понимания и обработки присутствия сигналов активности в поисках планет с малой массой.

Наша коррекция активности четко различает планетарные и звездные сигналы и снижает

астрофизическую ошуща в данных достаточно, чтобы сигналы планет с очень малой массой были

восстановлены с гораздо более высокой значимостью. Этот анализ также естественным образом объясняет коррелированное (красное)

шум наблюдался (11) при анализе данных HARPS и HIRES.

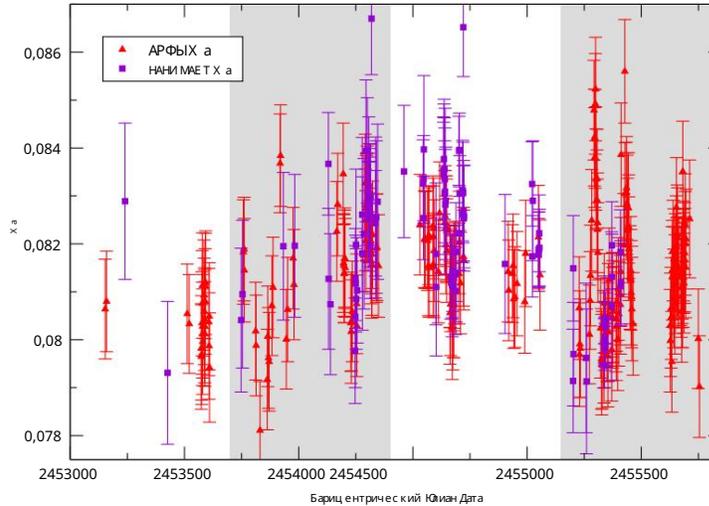


Рисунок 3: Индексы Na от HARPS (красный) и HIRES (фиолетовый). Периоды наибольшей вращательной модуляции заштрихованы. Обратите внимание на отсутствие значительного покрытия HIRES в последней заштрихованной области, где сигнал 66-дневного осциллятора является самым сильным как в RV, так и в INa.

Учитывая преимущества LA-обледований медленно вращающихся M-карликов малой массы для поиска LA, физический механизм, тормозящий конвективное движение в звездной атмосфере, должен быть в центре внимания дополнительной проверки. Магнитная активность, препятствующая местной скорости конвекции, у звезд солнечного типа неизменно сопровождается темным звездным пятном, поэтому низкий контраст пятен у звезд типа звезды Барнарда и GJ 581 может быть особенностью уникальной для звезд малой массы. Более надежный теоретическое моделирование магнитогидродинамики в атмосферах старых маломассивных звезд необходимо полностью понять это явление.

GJ 581d и (в настоящее время менее широко распространено мнение) GJ 581g считались одними из первых наземных планет, скорее всего, будет обитаемая среда, если они будут каменными (7, 15). Учитывая небольшой количество планет обитаемой зоны (HZ) (25), открытых с помощью доплеровских исследований вокруг M-карликов, удаление GJ 581d влияет на оценку  $\eta$ , основанную на RV (доля звезд с низкими

массы планет в их ГЦ) вокруг М-звезд. Это было оценено как  $\eta = 0,41 \pm 0,54$  по данным  $0,13$

Обзор картинок HARPS M (26). Исключение GJ 581d снижает этот показатель до 33%, что все еще находится в пределах заявленных планки погрешностей. Существуют более точные оценки  $\eta$  для М-звезд по Кеплеру (например, (5)), но различные пределы HZ, используемые в этих оценках, не позволяют проводить прямое сравнение. Хотя GJ 581 все еще может быть динамически способен разместить в своей ГЗ планеты земной массы, мы не видим никаких свидетельств в настоящее время для дополнительных планет в остатках с поправкой на активность вокруг нашей модели трех планет.

## Ссылки и примечания

1. Х. Бонфилс и др., *Astronomy & Astrophysics* 443, L15 (2005).
2. С. Удри и др., *Astronomy & Astrophysics* 469, L43 (2007).
3. М. Мэйор и др., *Astronomy & Astrophysics* 507, 487 (2009).
4. Ж.-Ф. Лестрейд и др., *Астрономия и астрофизика* 548, A86 (2012).
5. CD Dressing, Д. Шарбонно, *The Astrophysical Journal* 767, 95 (2013).
6. Р.К. Коппару, *The Astrophysical Journal Letters* 767, L8 (2013).
7. С. С. Фогт и др., *The Astrophysical Journal* 723, 954 (2010).
8. Т. Форвей и др., электронные отпечатки ArXiv 1109.2505, отправленные в журнал *Astronomy & Astrophysics*. (2011).
9. С.С. Фогт, Р.П. Батлер, Н.Х. Агигигур, *Astronomische Nachrichten* 333, 561 (2012).
10. П.К. Грегори, Ежемесячные уведомления Королевского астрономического общества 415, 2523 (2011).
11. Р.В. Балувев, Ежемесячные извещения Королевского астрономического общества 429, 2052 (2013).

12. A. P. X ац ес , *Astronomische Nachrichten* 334, 616 (2013b).
13. М Тадеу душ Сантос , Г . Г . Сильва, С. Феррас -Мелло, Т. А. Мицэнко, *Небес ная мех аника и Динамичес кая ас тронмия* 113, 49 (2012).
14. Ф. Селс ис и др., *Astronomy & Astrophysicals* 476, 1373 (2007).
15. Р.Д. Вордс ворт и др., *The Astrophysical Journal Letters* 733, L48 (2011).
16. Д.А. Джойнер, К. Сул, Д. Драг омир, С.Р. Кейн, М.Е. Крес с , электронные отпечатки ArXiv 1404.4381, приня то Ас трофизичес ким журналом (2014).
17. П. Робертс он, М. Эндл, В.Д. Кочран, С.Э. Додс он-Робинс он, *Ас трофизичес кий журнал*. 764, 3 (2013).
18. Р.Ф. Диас , К. Синкунег и, П.Дж.Д. Мауас , «Е жемес я чные уведомления Королевс ког о ас тронмичес ког о общес тва». *Общес тво* 378, 1007 (2007).
19. М. Цех майс тер, М. Курс тер, " *Astronomy & Astrophysicals* 496, 577 (2009).
20. W.H. Jefferys, M.J. Fitzpatrick, B.E. McArthur, *Celestial Mechanics* 41, 39 (1988).
21. С. Мес киари и др., *Публикац ии Тих океанс ког о ас тронмичес ког о общес тва* 121, 1016. (2009).
22. М. Курс тер Г . и др., *Astronomy & Astrophysicals* 403, 1077 (2003).
23. К.Г . Стас сун, К.М. Крагтер, А. Шольц , Т.Дж. Дюли, *The Astrophysical Journal* 756, 47. (2012).
24. И. Бойс е, Х. Бонфилс , Н. К. Сантос , *Astronomy & Astrophysicals* 545, A109 (2012).
25. Р.К. Колпарату и др., *The Astrophysical Journal* 765, 131 (2013).

26. Х. Бонфилс и др., *Astronomy & Astrophysics* 549, A109 (2013).

27. Ж. Гомес да Силва и др., *Astronomy & Astrophysics* 534, A30 (2011).

28. Г. Пойманский, Г. Мациевский, *Acta Astronomica* 54, 153 (2004).

29. В. Витале, К. Франс, *Астрономия и астрофизика* 558, A139 (2013).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.1101>, Google Scholar Crossref, CAS 30. С.Г. Энгел, Э.Ф. Гинан, Серия конференций Тихоокеанского астрономического общества, С. Кайн, 1999.

К. Люн, Л. Чжу, С. Квок, ред. (2011), том. 451 Тихоокеанского астрономического общества

Серия конференций, с. 285.

31. О. Басёрки, Далл, Р. Колле, Г. Ло Курто, С. О. Селам, *Астрономия и астрофизика* 535,

A17 (2011).

32. Дж. Т. Райт и др., *Астрофизический журнал* 770, 119 (2013).

Мы признательны за поддержку с стороны грантов NSF AST-1006676, AST-1126413, AST-1310885, PSARC и Института астробиологии НАСА (NNA09DA76A) в наших поисках точных космических аппаратов в NIR. Эта работа поддерживалась финансированием Центра экзопланет и обитаемых миров. Центр экзопланет и обитаемых миров поддерживается Университетом штата Пенсильвания, Научным колледжем Эберли и Консорциумом космических грантов Пенсильвании. ME поддерживается НАСА через грант NNX09AB30G программы «Происхождение солнечных систем» и грант AST-1313075 от NSF. В этом исследовании использовался Архив обсерватории Кека (KOA), которым управляет Обсерватория В.М. Кека и Институт науки об экзопланетах НАСА (NExSci) по контракту с Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства. Мы благодарим Чада Бендера за помощь в изучении теллурических оплощания в окрестностях На. Данные, полученные для этого исследования, включены в Таблицу S3 дополнительных материалов.

Дополнительные материалы

Материалы и методы

Рисунки S1-S10

Таблицы S1-S3

Ссылки (27-32)

## S1 Материалы и методы

### S1.1 Подтверждение периода вращения

(7) утверждает, что период вращения составляет 94 дня, основываясь на фотометрических наблюдениях в V-диапазоне с использованием телескопа Университета штата Теннесси, установленного на крыше обсерватории Дайер. Вместо этого мы пришли к выводу, что период вращения составляет 130 дней. Общие тугие данные подтверждают более длительный период. В спектрах HARPS как INa, так и ID показывают весьма значимый сигнал через 125 дней. В то время как INa показывает дополнительный сигнал около 138 дней, мы проверили, что это результат смещения фазы между сигналами вращения, наблюдавшимися в декабре 2005-сентябре 2007 г. и январе 2010 г. Эпохи июля 2011 г. ID также показывает второй сигнал на уровне 1300 дней, что соответствует частоте биений сигналы 125 и 138 дней и, следовательно, вероятно, также связаны с осевым фазы. Этот 1300-дневный период ранее был идентифицирован как цикл звездной активности (17,27), но это может быть просто период вращения звезды, наблюдаемое с помощью менее частой частоты вращения, используемой в этих исследованиях. Альтернативно, цикл может существовать, и цикл стимулирует две эпохи высокой изменчивости активности. Мы показываем наши периодogramмы для INa и ID на рисунке S1.

Подняв синусоиду к данным на январь 2006 г. — сентябрь 2007 г., мы получаем период вращения  $132 \pm 4$  дня. Для периодов наблюдений с января 2010 г. по июль 2011 г. мы моделировали Na переменность как сумму двух синусоид, имеющих период вращения звезды  $128 \pm 4$  дня. Предполагая, что каждая эпоха представляет собой статистически независимую выборку периода вращения, мы считаем окончательный период вращения GJ 581 в  $130 \pm 2$  дня.

Отметим, что в эпоху 2010-2011 гг. мы наблюдаем весьма значимый ( $FAP = 10^{-9}$ ) сигнал в областях INa вокруг аппроксимации одной синусоиды. Пик периодogramмы приходится на 69 дней, около половины периода вращения. Подняв к этому периоду вторую синусоиду, находим сигнал на 69-м дне осевым фазы на  $150^\circ$  радиус от сигнала вращения. F-тест дает вероятность  $P = 1,2 \times 10^{-5}$  для нулевой гипотезы о том, что данные более согласуются с аппроксимацией 1-синусоиды, поэтому

мы приходим к выводу, что вторая синусоида должна быть статистически значимой. 2-сигналы соответствуют соотношению 2:1.

соотношение периодов и сдвиг фаз, близкий к 180 градусам, соответствует наличию двух активных

областей на противоположных сторонах звезды. Мы показываем периодogramмы и 2-сигнальную модель для этого.

эпоха на рисунке S2. Все наши соответствия даны на перечислены в таблице S1.

X-от фотометрические наблюдения GJ 581 показывают небольшую изменчивость, имеющиеся данные

фактически соответствуют 130-дневному периоду ротации. Включаем периодogramму AC AC

Фотометрия V-диапазона (28) GJ 581 на рисунке S1. X-от сигнал не такой сильный, как в

спектральные трассеры, имеется четкий пик на 130-й день. Существует также менее значительный пик вблизи

предполагаемый 94-дневный период, что позволяет предположить, что период вращения является псевдонимом истинного сигнала. Кроме того, X-от Фогт

и другие не занесли в таблицу свои фотометрические данные, с вою периодogramму фотометрии (рис. 1

в их статье) показывает широкий пик в 125 дней в дополнение к 94-дневному пику. Поэтому мы

пришли к выводу, что фотометрические наблюдения GJ 581 согласуются с нашим собственным анализом активности.

Наконец, отметим, что более длительный период вращения больше соответствует рентгеновскому излучению GJ 581.

считаем. SWIFT/XRT-наблюдения GJ 581 дали рентгеновскую величину  $\log(LX) = 26,2$ .

(29). Используя кривую возраст-вращательная активность (30), эта величина предполагает период вращения

должен быть больше 100 дней. X-от это эмпирическое соотношение с само по себе недостаточно, чтобы

если ограничить период вращения, это еще одно свидетельство в пользу нашего 130-дневного периода.

Интересно, что кривая возрастной ротации и активности указывает на то, что GJ 581 должен иметь возраст

10 млрд лет, что делает ее одной из старейших известных звезд главной последовательности, на которой находится

многопланетная система.

## S1.2 Коррекция звездной активности

Для каждой эпохи наблюдений, в которой мы наблюдаем статистически значимую корреляцию RV-IRa,

мы моделировали и удалили линейную аппроксимацию данных методом наименьших квадратов, чтобы исключить влияние

поведения звездной магнитной активности. Исключения, которые мы применяем, показаны на рисунке S3 и перечислены.

в Таблице S2, вместе с соответствующими коэффициентами корреляции Пирсона и вероятности отсуживания корреляция. Хотя мы видим доказательство умеренно значимой корреляции в отчете 2005 г. эпох данных, аппроксимация отношения методом наименьших квадратов дает наклон, который значим только при 2 $\sigma$  уровень. Учитывая, что другие наши аппроксимации имеют наклоны, значимые до 4 $\sigma$  или более, мы решили не добавлять такую неопределенная дополнительная поправка к данным.

#### S1.2.1 Корреляция активности-RV с двумя активными областями

Как упоминалось выше, эпоха наблюдений 2010-2011 гг. включает в себя убедительные доказательства того, что наличие двух активных областей на противоположных сторонах звезды. Поскольку период сигнала на индуцированный второй активной областью нас только похож на 66-дневный сигнал ПЖ, что мы исследовали точная корреляция активности RV для каждого из двух сигналов на, присутствующих в это время.

На рисунке S4 мы показываем RV как функцию  $I_{Na, res}$ , остатка  $I_{Na}$  после вычитания одного из двух синусоидальных сигналов, перечисленных в Таблице S1. Коэффициент корреляции Пирсона для данные с удаленным сигналом 128-дневного вращения составляя  $r = -0,48$ , что согласуется с сильным анти-корреляции, наблюдаемые в другие эпохи, при этом  $r = -0,16$  с вычетом 69-дневного сигнала на, что указывает на отсутствие существенной корреляции. Это предполагает, как и ожидалось, антикорреляция активности RB. полностью управляется 69-дневным сигналом на в эпоху, содержащую две активные области. Доминирование первой гармоники вращения звезды над осевой в RV может быть лучше понятен в этом контексте, поскольку 109 из 240 наблюдений относятся к этой эпохе. Для того, чтобы представляем наиболее физически мотивированную коррекцию активности, мы перечисляем соответствующие активности-RV с удаленным из  $I_{Na}$  сигналом 128-дневного вращения в Таблице S2.

Важно отметить, что, хотя поправка, указанная в Таблице S2, является нашей лучшей моделью для сигнала вращения звезды, качественные результаты нашего анализа нечувствительны к тому, как мы делим данные на подмножества. Действительно, значительная корреляция  $RV-I_{Na}$  присутствует даже при рассмотрении всех данные вместе. На рисунке S5 мы показываем RV как функцию  $I_{Na}$  для всего набора данных после

удаление трех планет. Если мы удалим корреляцию наблюдаемых в общем наборе данных, мощность 66-дневного сигнала все еще значительно снижается, но не устраняется полностью.

И в нашем анализе активности, и в анализе RV мы исследовали спектр HARPS, полученный при БЖД = 2454610,74293237. Этот спектр имеет аномально высокую эмиссию как в Na, так и в натрия, что привело нас к выводу, что это может быть связано с пышкой. Заметим, что это было ни один из спектров не был исследован из последующего анализа HARPS (9).

Применив поправку на активность, получим орбитальную модель, представленную в табл. 1.

Схема этой модели показана на рисунке S6.

### S1.3 Влияние активных областей на RV

Чтобы оценить влияние активных областей на спутники GJ 581, мы смоделировали звездные пятна, которые должны иметь такие же качественные отпечатки RV, как и активные области, с использованием Spot Code колебаний и планет (SOAP) (24). Как обсуждалось в статье, мы исследовали звездное наклонение под углом 50°, что в общих чертах основано на наличии диска обломков под этим наклоном. Для каждого При моделировании мы выбрали результирующий сигнал RV с частотой данных HARPS и с охранила неопределенность HARPS RV.

На рисунке S7 показаны полученные периодogramмы из смоделированных пятен на трех разных широтах. Мы видим, что для пятен, расположенных ближе к звездному экватору, сигнал RV смещается от вращения звезды период до первой гармоники, что соответствует 66-дневному сигналу, наблюдаемому на реальных KA.

Для эпох наблюдений 2010-2011 гг. мы также смоделировали эффекты двух активных повторов. г ионы на звезде. Что касается моделирования с одиночной AR, мы зафиксировали наклонение звезды на уровне 50° и отбирали смоделированный сигнал RV с частотой наблюдений HARPS в течение последующих два сезона наблюдений. АО разделены по долготе на 180°. Как показано в периодogramме моделируемых ЛА (рис. S8), сигнал «планеты d», включая ее псевдонимы в позиции 51 и 88 дней – четко воспроизводится двумя AP. Кроме того, хотя SOAP не имитирует

Эмиссия Na, ее смоделированная фотометрия согласуется с наблюдаемым нами поведением активности во время этой эпохи; периодogram фотометрии снова показывает пики на периоде вращения и  $P_{rot}/2^2$ .

## S1.4 Биссекторный анализ

Чтобы подтвердить наличие звездной активности в профилях линий, мы исследуем биссектрисы функции взаимной корреляции (CCF), предоставляемая HARPS (31). В частности, мы используем заказы в диапазоне длин волн 5432–6212 Å, поскольку более синие порядки имеют меньший поток, а более красные порядки обычно ожидается, что он будет проявлять меньшую зависимость от звездной активности (рис. S9a).

Мы суммируем CCF (обеспечиваемые сращиванием HARPS) выбранных заказов, чтобы получить агрегируйте и вычислите обратный наклон биссектрисы (BIS), как описано в (32). Мы предпочитаем называть и использовать BIS вместо использования измерения биссектрисы CCF (CBS), предоставляемого Данные HARPS для нас тройки выбора порядка. Шесть спектров (BJD=2455349.63633994, 2455370.57817460, 2455390.54432217, 2455396.49708365, 2455443.49985669, 2455663.75875103) с низким средним количеством CCF искажаются, поскольку они вызывают высший BIS-ошибки (рис. S9b). Обратите внимание, что ошибки BIS определялись по дисперсии каждого значения между различными порядками эшелле. Из трех сезонов наблюдений с значимыми анти-RV-INa корреляция, третий интересующий сезон (с января 2010 г. по июль 2011 г.) показывает самый сильный BIS-INa. Соответственно, коэффициент корреляции Пирсона  $r = 0,363$ , согласованию предварительным Верно утверждение, что это временной период наибольшей наблюдаемой активности (рис. S10). Пока коэффициент корреляции указывает на высокий уровень достоверности ( $P(r) = 1,8 \times 10^{-4}$ ), подчеркнем что этот результат чувствителен к диапазону длин волн (порядков), выбранному для анализа. Вариант

<sup>2</sup>Чтобы фотометрия соответствовала нашим наблюдениям, одна из двух активных областей должна быть ярче другой. Это понятно в астрофизическом контексте, поскольку любые активные области, наблюдаемые в Na, будут иметь различный вклад от пятен, плазмы и волокон.

3BIS-INa положителен, что мы и ожидаем, поскольку BIS и RV антикоррелируют, и мы видим, что RV антикоррелирует с INa.

в форме биссектрисы, как свидетельствует BIS, указывает на изменения профиля линии, влияющие на измерение RV. Это объясняется с эффектом звездной активности.

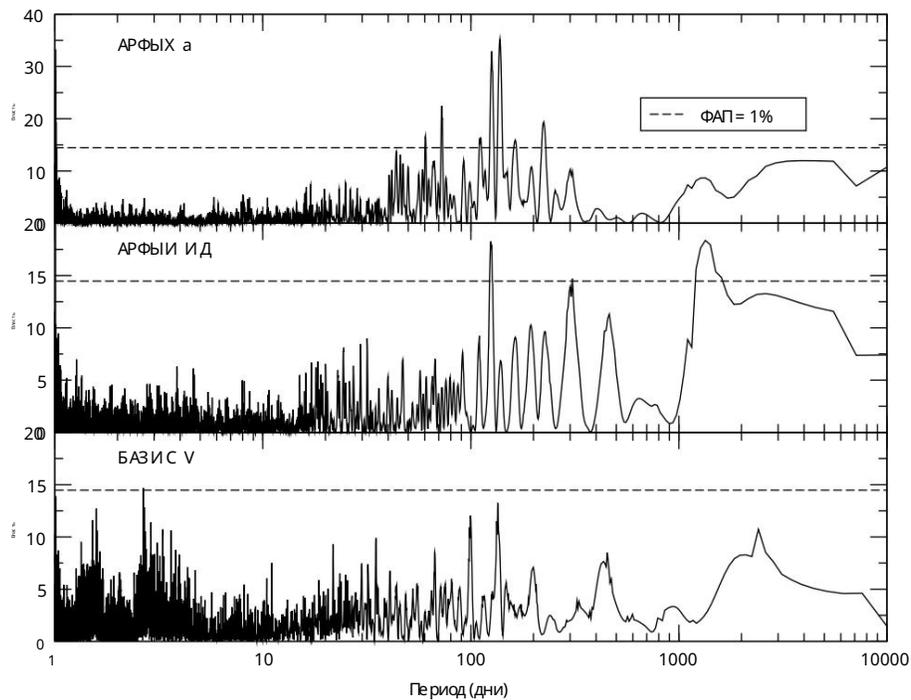


Рисунок S1: Обобщенные периодограммы Ломба-Скарга для трекеров с спектральной и фотометрической активностью. Пик около 130 дней выявляется во всех трассерах, что позволяет нам сделать вывод, что это должно быть период вращения. Второй пик на 138 сутках на периодограмме Na I обусловлен фазовым сдвигом сигнала вращения, а пик на 1300 сут в линии Na ID представляет собой частоту биений двух самых высоких пиков Na. Данные Na I более зашумлены, чем данные Na, из-за присутствия теллурических эмиссионных линий в этой спектральной области.

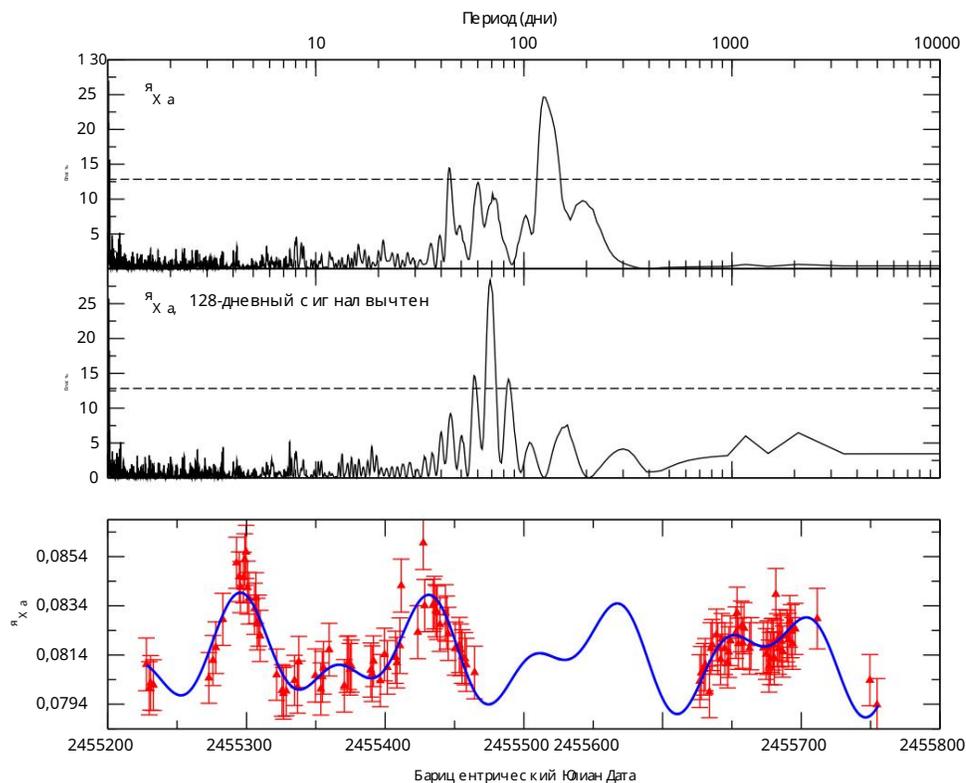


Рисунок S2: Вверху: Периодог рамма IHa с я нваря 2010 г . по июль 2011 г . В центре: Остаточная периодог рамма IHa тех же данных после моделирования и удаления 128-дневного вращения звезды. с иг нал. Пунктирные линии обозначают уровень мощно сти, необх одимый для вероя тнос ти ложной тревог и 1%. с ог лас но(11). Внизу: IHa зас езон наблюдений с я нваря 2010 г . по июль 2011 г . Наша двух с иг нальная (P1 = 128d, P2 = 69d) модель данных показана с иним ц ветом.

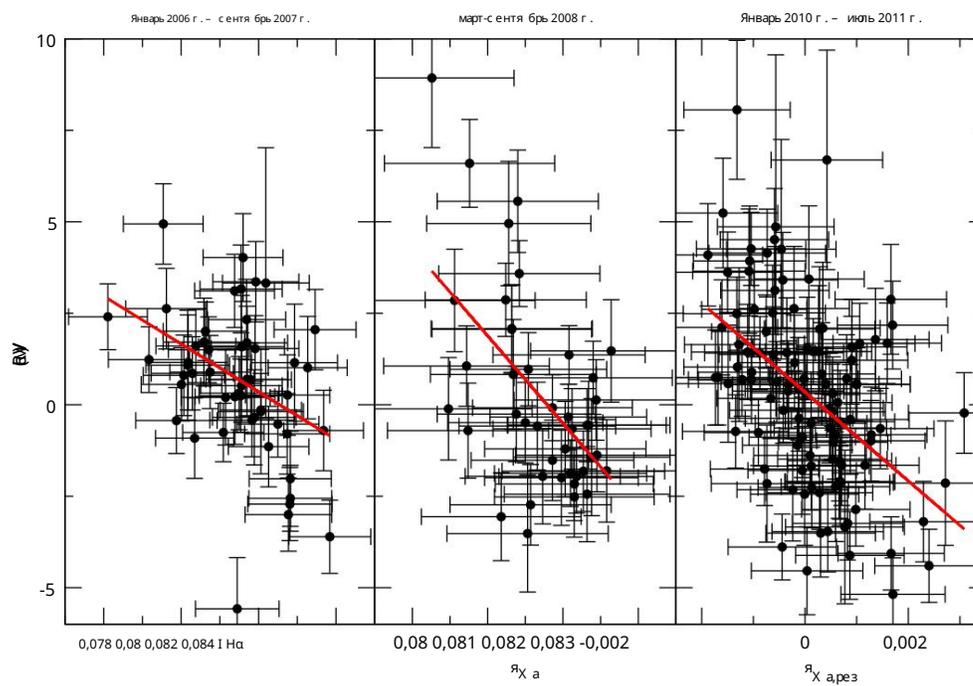


Рисунок S3: RV как функция  $I_{H\alpha}$  для каждой из трех эпох в таблице S2. Линейный метод наименьших квадратов, соответствующий каждой эпохе, показан сплошной красной линией. Обратите внимание, что в сегменте 2010-2011 г.г. мы удалили сигнал вращения звезды за 128 дней из  $I_{H\alpha}$  (см. раздел S1.2.1).

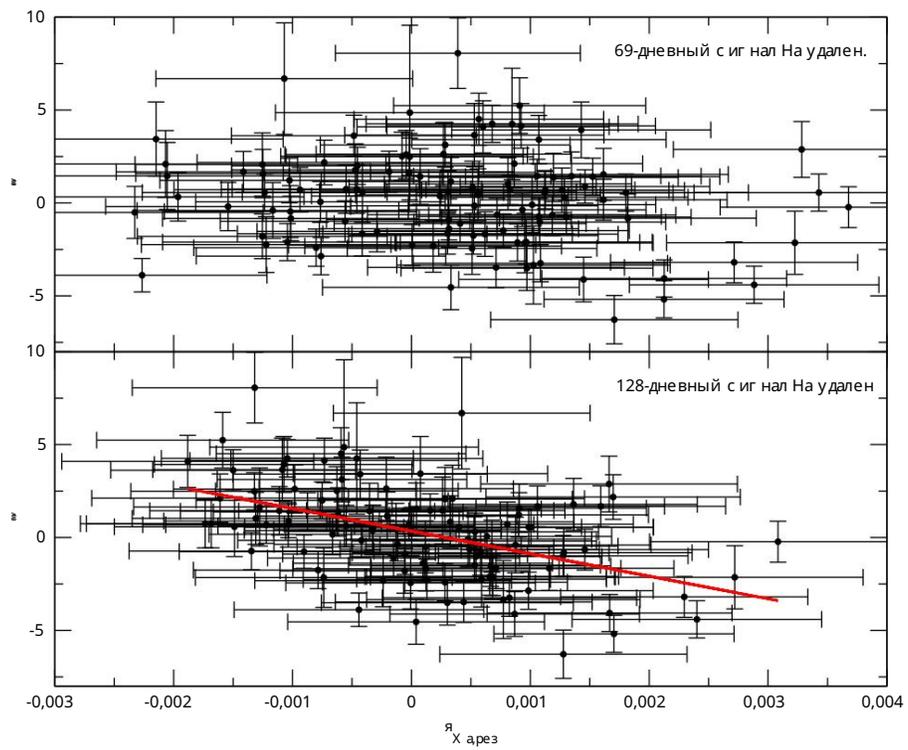


Рисунок S4: RV как функция  $I_{Na}$  для сезонов наблюдений с января 2010 г. по июль 2011 г. В каждой панели, один из двух сигналов активности, описанных в разделе S1.1, был удален из  $I_{Na}$ .

Наш линейный метод наименьших квадратов, соответствующий данным после вычитания сигнала 128-дневного вращения, показан на рисунке.

красный.

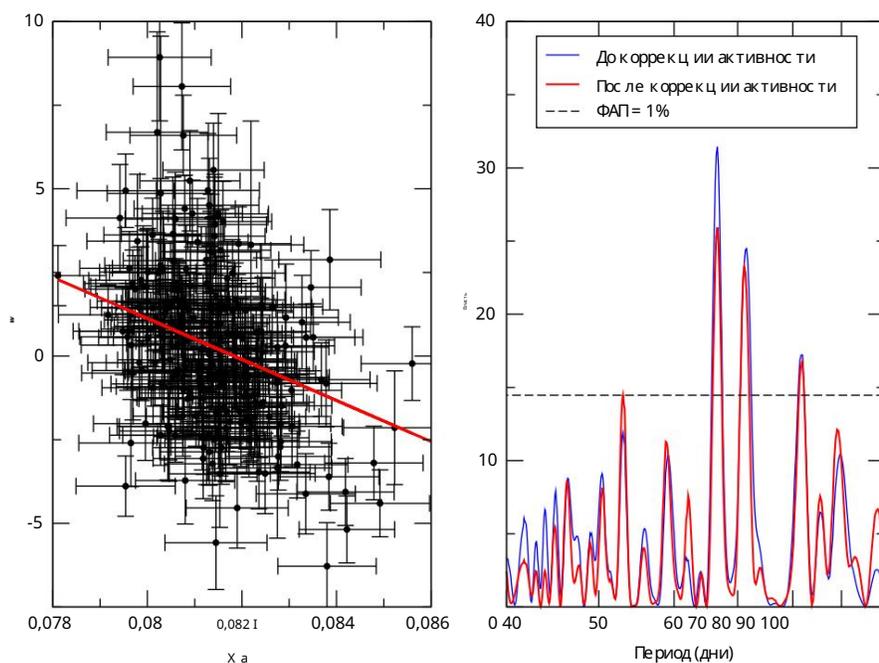


Рисунок S5: Слева: RV как функция  $x_a$  с использованием всех RV HARPS одновременно в одной корреляции. Планеты b, c и e были удалены. Наш линейный метод наименьших квадратов, соответствующий данным, показан сплошной красной линией. Справа: обобщенная периодограмма Ломба-Скарга RV HARPS после вычитания планет b, c и e. Даже при рассмотрении зависимости RV-активности по всему набору данных сигнал планеты d существенно снижается.

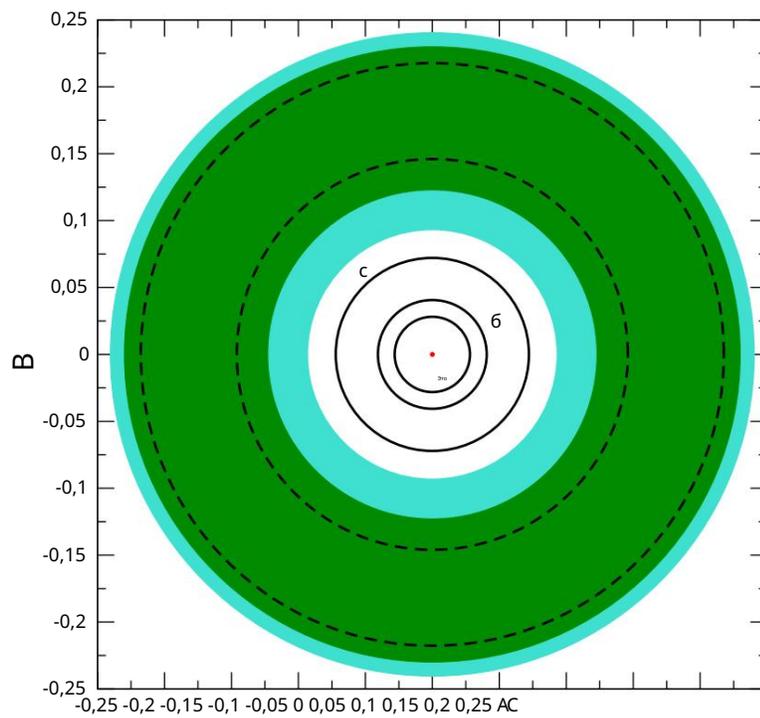


Рисунок S6: Схема нашей орбитальной модели трех планет. Радиус звезды нарисован в масштабе. Орбиты, приписываемые 36- и 66-дневным гармоникам вращения звезды по (7), показаны пунктирными линиями вместе с консервативной (темно-зеленой) и оптимистической (светло-зеленой) границами обитаемой зоны согласно (25).

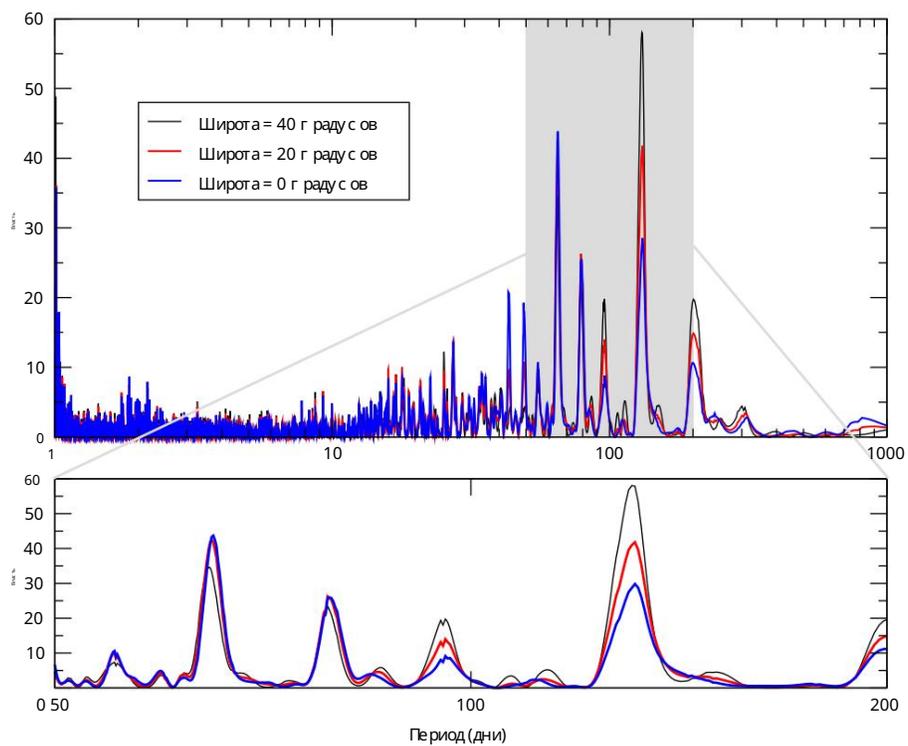


Рисунок S7: Периодogramмы с сигналами RV, вызванных активностью с использованием SOAP (24) для активных регионов на разных широтах. Выборка RV осуществляется с использованием выборки и ошибок HARPS. На этой иллюстрации наклонение звезды зафиксировано на уровне 50°. По мере приближения активных областей к экватору пик на периоде вращения  $P_{rot}$  уменьшается, а пик на  $P_{rot}/2$  увеличивается. Подчеркнем, что эта модель, показывающая, как в KAS создаются гармоники периода вращения.

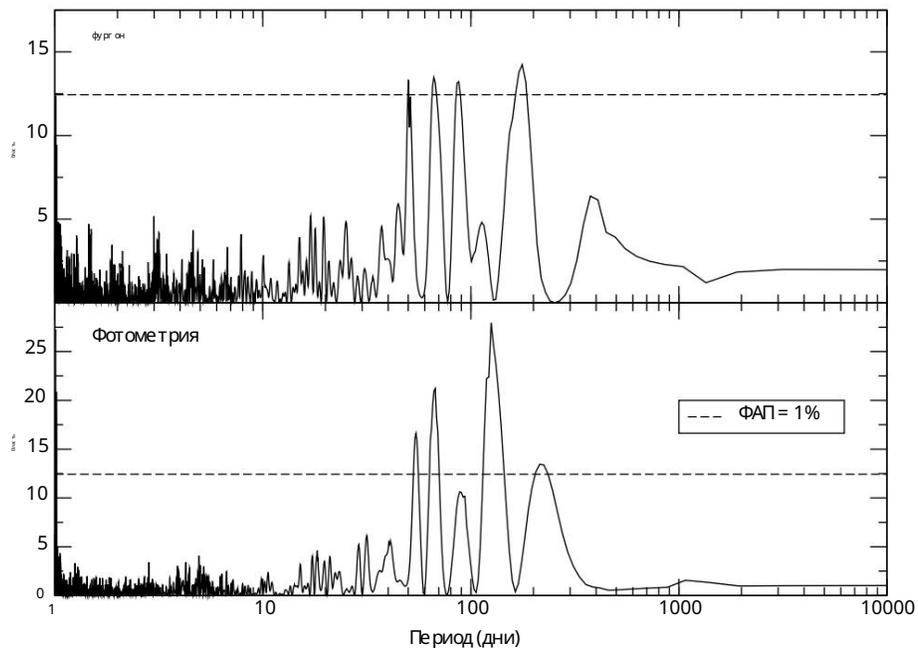


Рисунок S8: Периодogram раммы вызванной активностью RV (вверху) и фотометрической изменчивости (внизу) на основе SOAP-моделирования двух активных областей в эпоху 2010–2011 годов. Период вращения равен 130 дням, наклонение звезды  $50^\circ$ , активные области разделены  $180^\circ$  по долготе. Широкий пик в 180 дней — это псевдонимическое явление периода, вызванное частотой наблюдений. Остальные три самых высоких пика на периодogramе RV соответствуют периоду «планеты d» и ее псевдонимов. Для сравнения с реальными данными периодogram рамма, показывающая реальный 66-дневный сигнал ПЖ, показана на нижней панели рисунка 2, а периодogram раммы индексов активности приведены на рисунке S1.

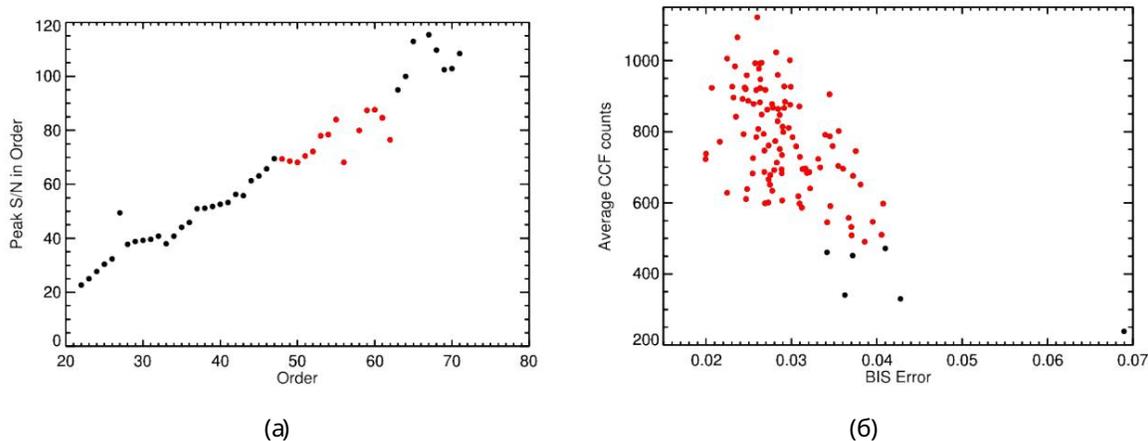


Рисунок S9: а: Пиковое отношение сигнал/шум (SNR) в каждом порядке как метод выбора непрерывного набора порядков с относительно высоким потоком и чувствительностью к активности. Красные точки показывают выбранные порядки и б: Среднее SNR в CCF на бинах скорости (161 бин шириной 0,25 км/с), как порог для удаления спектров с низким потоком и, следовательно, больших ошибок BIS. Красные точки показывают выбранные спектры.

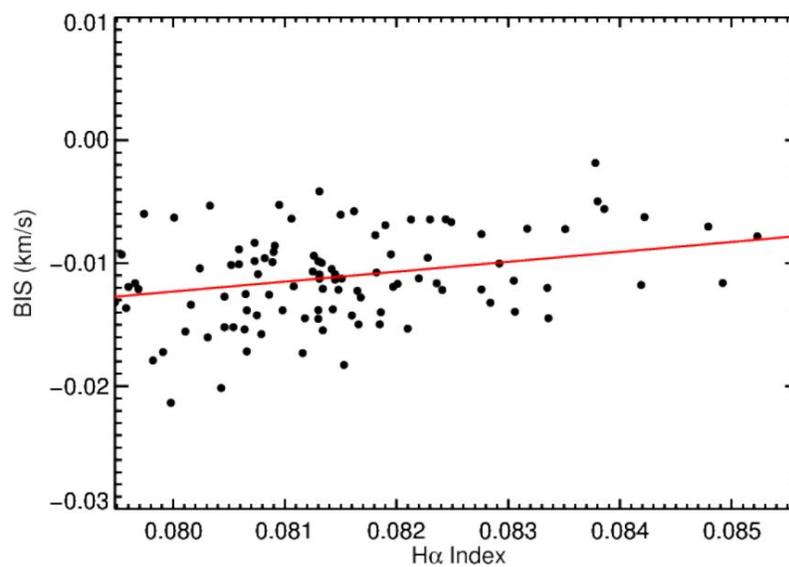


Рисунок S10: Корреляция между обратным наклоном бис спектры (BIS) и индексом активности H $\alpha$  (IH $\alpha$ ) в течение третьего интересующего сезона (с января 2010 г. по июль 2011 г.) с  $r = 0,36$ .

Сигнал	Период (дни) (в $I_{H\alpha} \times 1000$ ) (BJD-2450000)	Амплитуда	$T_{\max}$
Январь 2006 г. – сентябрь 2007 г. Звездное вращение	$132 \pm 4$	$1,4 \pm 0,2$	$3649 \pm 4$
Январь 2010 г. – июль 2011 г. Звездное вращение	$128 \pm 4$	$1,5 \pm 0,1$	$5168 \pm 3$
Звездный «Полуповорот»	$69 \pm 1$	$1,1 \pm 0,1$	$5226 \pm 2$

Таблица S1: Синусоидальные модели  $I_{H\alpha}$  в эпохи, в которых мы наблюдаем вращение звезды сигнал.

Эпоха $RV(I_{H\alpha})$ (м/с)	$\rho$	$\Gamma(\rho)$
$0,455 \times 10^{-4}$		
Январь 2006 г. – сентябрь 2007 г. $RV = 54(15) - 650(190) \times I_{H\alpha}$		
Март-сентябрь 2008 г. $RV = 200(50) - 2400(600) \times I_{H\alpha}$		
Январь 2010 г. – май 2011 г. $\rho = 0,35(0,2)$ $1200(200) \times I_{H\alpha, \text{res}}$		$0,486 \times 10^{-8}$

Таблица S2: Линейный метод наименьших квадратов аппроксимирует соотношение  $RV-I_{H\alpha}$  для каждого из трех наблюдательных эпохи, в которых мы применяем поправку на звездную активность. Сигналы спутников планет b, c и e были удалены перед вычислением подгонок. Для каждой эпохи мы включаем корреляцию Пирсона коэффициент  $\rho$  и соответствующая вероятность отсуживания корреляции  $P(\rho)$ .

Таблица S3: Индексы активности H $\alpha$  и Na ID из общедоступных спектров HARPS, а также с соответствующими им C V из (8). Мы определили спектр по адресу 2454610,74293237 до быть аномально высокими в обоих индексах активности, что потенциально указывает на вспышку, и, следовательно, иметь исключили его из нашего анализа. Последние три спектра не имеют опубликованных значений RV и поэтому исключены из нашего анализа RV.

BJD - 2 450 000 H $\alpha$	с	е	с	т	р	e	н	a	с	т	r	e	n	a	σID	RV (м/с)	σRV (м/с)
																	(из (8))
3152,71289435	0,08064	0,00104	0,06131	0,00199	10,25	1,10											
3158,66345975	0,08080	0,00105	0,06627	0,00198	19,05	1,30											
3511,77334131	0,08054	0,00104	0,06923	0,00186	7,25	1,20											
3520,74474617	0,08033	0,00103	0,06699	0,00187	10,35	1,40											
3573,51203908	0,07965	0,00110	0,06574	0,00209	0,65	1,30											
3574,52232941	0,07983	0,00109	0,06622	0,00212	9,05	1,10											
3575,48074894	0,07969	0,00104	0,06625	0,00190	4,35	1,00											
3576,53604566	0,08035	0,00107	0,06552	0,00205	7,15	1,00											
3577,59260329	0,08076	0,00110	0,06500	0,00206	10,85	1,20											
3578,51071262	0,08113	0,00110	0,06370	0,00196	0,35	0,90											
3578,62960203	0,08012	0,00108	0,06512	0,00198	2,25	1,10											
3579,46255685	0,08028	0,00108	0,06542	0,00204	13,25	0,90											
3579,62104900	0,07996	0,00110	0,06424	0,00209	14,75	1,10											
3585,46177062	0,08093	0,00115	0,06587	0,00213	7,75	1,10											
3586,46515860	0,08059	0,00111	0,06501	0,00200	3,05	0,80											
3587,46470413	0,08043	0,00107	0,06608	0,00225	17,25	1,60											
3588.53806182	0.08028	0.00118	0.06399	0.00250	3589.46202396										8,15	2,60	
0.08012	0.00109	0.06551	0.00202	3590.46389515	0.08080	0.00110									6,05	0,80	
0.06395	0,00199	12,75	0,80														
3591,46648375	0,08112	0,00110	0,06539	0,00206	7,75	0,80											
3592,46481341	0,08119	0,00108	0,06565	0,00201	5,25	0,80											
3606,55167944	0,08037	0,00112	0,06543	0,00240	14,85	2,10											
3607,50752689	0,07987	0,00111	0,06538	0,00197	11,55	1,00											
3608,48264332	0,08049	0,00112	0,06696	0,00199	3,75	1,20											
3609,48845185	0,07942	0,00114	0,06465	0,00216	11,35	1,60											
3757,87731922	0,08183	0,00109	0,06323	0,00205	5,75	1,00											
3760,87547540	0,08189	0,00108	0,06455	0,00212	1,45	1,30											
3761,85921591	0,08145	0,00108	0,06180	0,00211	7,45	1,40											
3811,84694254	0,08018	0,00102	0,06611	0,00218	6,45	1,30											
3813,82701666	0,07988	0,00105	0,06468	0,00197	9,95	0,90											
3830,83695707	0,07811	0,00102	0,06759	0,00191	1,75	0,90											
3862,70144100	0,07917	0,00105	0,06596	0,00200	-0,55	0,90											
3864,71366151	0,08007	0,00105	0,06692	0,00201	13,85	1,10											
3867,75217074	0,07962	0,00105	0,06653	0,00198	9,25	1,10											
3870,69660298	0,07954	0,00103	0,06641	0,00202	6,35	1,10											
3882,65776272	0,08071	0,00104	0,06418	0,00201	11,35	0,90											
3887,69073769	0,08109	0,00105	0,06347	0,00207	5,65	0,80											

Таблиц а 53 (продолжение)

BJD - 2 450 000 IHa RV (m/c)	$\sigma$ RV (m/c)	-----	$\sigma$ ID
3918,62175058	0,08368	0,00103	0,06458 0,00207 7,75 1,10
3920,59494713	0,08384	0,00106	0,06280 0,00208 18,45 1,00
3945,54312171	0,08001	0,00104	0,06621 0,00202 9,25 1,00
3951,48592717	0,08063	0,00109	0,06532 0,00201 6,55 0,80
3975,47159589	0,08170	0,00106	0,06446 0,00220 7,35 1,00
3979,54397490	0,08115	0,00115	0,06458 0,00220 7,35 1,30
4166,87418187	0,08226	0,00104	0,06321 0,00205 12,85 1,10
4170,85396096	0,08282	0,00107	0,06199 0,00204 7,95 0,90
4194,87234931	0,08346	0,00106	0,06611 0,00191 12,45 1,10
4196.75038397	0.08160	0.00103	0.06482 0.00213 4197.84503865 16,35 1,20
0.08155	0.00106	0.06330	0.00230 4198.85550900 0.08139 0.00103 15,25 1,20
0 .06301	0,00221	4199,73286924	0,08138 0,00103 0,06272 0,00207 2,15 1,30
5,35	1,00		
4200,91091462	0,08169	0,00101	0,06434 0,00228 0,05 1,10
4201,86855390	0,08170	0,00105	0,06385 0,00216 9,35 1,00
4202,88259492	0,08150	0,00103	0,06233 0,00206 12,55 1,00
4228,74156134	0,08035	0,00101	0,06512 0,00191 8,55 1,10
4229,70047777	0,08017	0,00108	0,06406 0,00203 10,35 1,50
4230,76213594	0,08038	0,00103	0,06433 0,00196 1,75 1,00
4234,64591609	0,08059	0,00105	0,06638 0,00186 14,65 1,20
4253,63316819	0,08075	0,00104	0,06581 0,00187 9,35 1,00
4254,66480986	0,08029	0,00106	0,06650 0,00189 4,35 1,00
4291,56884952	0,08327	0,00102	0,06255 0,00222 6,85 1,40
4292,59081443	0,08250	0,00106	0,06281 0,00208 0,25 0,90
4293,62586765	0,08206	0,00105	0,06313 0,00213 9,85 1,00
4295,63944847	0,08274	0,00110	0,06216 0,00207 10,35 1,10
4296,60611381	0,08282	0,00106	0,06367 0,00222 19,65 1,30
4297,64193914	0,08281	0,00109	0,06110 0,00205 8,25 1,00
4298,56759966	0,08275	0,00109	0,06334 0,00221 7,75 1,10
4299,62219505	0,08293	0,00111	0,06222 0,00230 10,95 1,60
4300,61910960	0,08277	0,00112	0,06149 0,00206 -0,95 1,00
4315.50749361	0.08206	0.00110	0.06344 0.00226 4317.48084703 14.05 1.70
0.08180	0.00105	0.06215	0.00208 4319.49052713 0.08156 0.00111 6,95 1,00
0 .05922	0,00228	2,95	1,40
4320,54407172	0,08156	0,00105	0,06228 0,00204 10,95 1,00
4323,50705017	0,08219	0,00112	0,05650 0,00304 11,05 3,70
4340,55578099	0,08191	0,00113	0,06281 0,00210 -1,65 0,90
4342,48620376	0,08193	0,00111	0,06358 0,00208 19,05 1,10
4349,51516265	0,08154	0,00107	0,06443 0,00208 11,85 1,00
4530,85566014	0,08240	0,00105	0,06261 0,00203 8,25 1,00
4550,83127371	0,08210	0,00101	0,06354 0,00201 6,45 0,90
4553,80372171	0,08208	0,00101	0,06325 0,00206 12,85 0,80
4563,83800153	0,08207	0,00104	0,06247 0,00209 3,95 0,90
4566,76114737	0,08212	0,00105	0,06349 0,00216 0,95 1,10

Таблица 53 (продолжение)

BJD - 2 450 000 IHa RV (mс)	$\sigma$ RV (mс)	-----	$\sigma$ ID
4567,79167115	0,08154	0,00104	0,06256 0,00216 9,35 1,00
4569,79330162	0,08218	0,00103	0,06298 0,00208 14,35 1,00
4570,80424813	0,08215	0,00105	0,06443 0,00217 14,35 1,00
4571,81837609	0,08150	0,00103	0,06390 0,00217 4,15 1,10
4587,86196779	0,08238	0,00104	0,06416 0,00213 3,55 1,60
4588,83879925	0,08157	0,00107	0,06267 0,00199 9,75 1,10
4589,82749271	0,08215	0,00106	0,06274 0,00197 6,05 1,10
4590,81963366	0,08232	0,00105	0,06286 0,00198 4,95 1,00
4591,81712025	0,08153	0,00107	0,06344 0,00220 19,55 1,60
4592,82733676	0,08186	0,00106	0,06280 0,00195 4610,74293237 9,75 0,90
0,08769	0,00103	0,07275	0,00157 4611,71347745 0,08142 0,00107 19,55 1,10
0,06282	0,00200	4616,71302788	0,08264 0,00107 0,06292 0,00196 9,05 0,90
8,75	1,40		
4639,68650798	0,08244	0,00109	0,06072 0,00202 9,55 1,10
4640,65440901	0,08258	0,00105	0,06104 0,00216 10,15 1,40
4641,63170643	0,08245	0,00108	0,06149 0,00205 1,65 1,00
4643,64499761	0,08232	0,00110	0,06005 0,00223 2,35 1,30
4644,58702786	0,08198	0,00102	0,06107 0,00208 9,85 1,30
4646,62535674	0,08234	0,00108	0,06091 0,00215 7,05 1,20
4647,57911911	0,08227	0,00108	0,05998 0,00208 7,85 1,10
4648,48481691	0,08186	0,00108	0,06251 0,00210 10,05 1,10
4661,55370583	0,08132	0,00107	0,06268 0,00202 11,65 1,20
4662,54940760	0,08056	0,00107	0,06251 0,00209 -1,05 1,40
4663,54486562	0,08132	0,00106	0,06269 0,00208 14,15 1,20
4664,55304174	0,08074	0,00107	0,06230 0,00203 13,25 1,30
4665,56937618	0,08124	0,00107	0,06255 0,00203 6,65 1,00
4672,53172294	0,08026	0,00109	0,06249 0,00218 4,55 1,90
4674,52411958	0,08048	0,00111	0,06394 0,00216 9,35 1,40
4677,50511368	0,08072	0,00110	0,06399 0,00207 9,55 1,10
4678,55678527	0,08076	0,00113	0,06205 0,00203 2,85 1,20
4679,50403353	0,08128	0,00109	0,06462 0,00220 13,25 1,70
4681,51414324	0,08134	0,00110	0,06167 0,00215 4682,50334275 3,15 1,50
0,08140	0,00107	0,06151	0,00204 4701,48507398 0,08138 0,00105 5,85 1,40
0,06400	0,00203	4703,51304213	0,08203 0,00107 0,06543 0,00212 14,15 1,30
4708,47904950	0,08118	0,00106	0,06442 0,00212 4721,47303256 1,75 1,30
0,08 173	0,00103	0,06714	0,00226 14,45 1,30 5,35 1,20
4722,47237098	0,08166	0,00104	0,06531 0,00225 2,65 1,20
4916,91734966	0,08142	0,00105	0,06276 0,00202 4,55 1,00
4919,77750721	0,08103	0,00105	0,06266 0,00206 13,95 0,90
4935,69136142	0,08138	0,00102	0,06418 0,00213 13,75 1,10
4938,77022542	0,08154	0,00108	0,06574 0,00210 4,85 1,10
4941,70398890	0,08085	0,00103	0,06532 0,00207 12,45 1,00
4946,74298194	0,08089	0,00105	0,06887 0,00205 4,95 1,10

Таблиц а 53 (продолжение)

БЖД - 2 450 000 ИHa σИHa	σID	RV (м/с)	σRV (м/с)
4955.79357698 0,08117 0,00109 0,06708 0,00188 4989,67873633		6,75	1,00
0,08079 0,00107 0,06836 0,00201 4993,61155423 0,08180 0,00111 0		5,55	1,00
.06705 0,00194 5049,51551307 0,08214 0,00108 0,06293 0,00220		6,45	1,00
5056,52501198 0,08135 0,00115 0,05881 0,00253 5227,84095142 0,08		0,25	1,30
066 0,00107 0,06450 0,00199 5229,88061948 0,07969 0,00108 0,06544		12,45	2,90
0,00199 5230,85894510 0,07991 0,00111 0,06717 0,00205 5232.		11,35	1,10
88302245 0,07982 0,00103 0,06516 0,00197 5272,83531355 0,08011		5,75	1,40
0,00103 0,05985 0,00281 5275,80926058 0,08082 0,00102 0,06117		8,15	1,80
0,00341 5277,83040795 0,08134 0,00105 0,06256 0,00192 1,75 1,20		16,25	1,80
		2,85	1,10
		9,25	1,30
5282,86587023 0,08249 0,00106 0,06328 0,00207 1,45 1,20			
5292,84315218 0,08479 0,00104 0,06355 0,00204 7,45 1,10			
5294,77401958 0,08422 0,00101 0,06239 0,00209 17,25 1,00			
5295,68471470 0,08380 0,00104 0,06330 0,00215 13,45 1,30			
5297,76796578 0,08419 0,00103 0,06233 0,00214 10,05 1,00			
5298,73451600 0,08492 0,00105 0,06320 0,00213 4,05 1,00			
5299,68211722 0,08523 0,00108 0,06602 0,00226 7,15 1,70			
5300,72869129 0,08378 0,00108 0,06077 0,00210 15,15 1,30			
5301,84322951 0,08335 0,00105 0,06259 0,00213 6,25 1,20			
5305,80849866 0,08292 0,00104 0,06334 0,00210 12,65 1,00			
5306,76723577 0,08336 0,00103 0,06313 0,00210 6,85 1,00			
5307,76067164 0,08230 0,00105 0,06295 0,00206 8,65 0,80			
5308,75780976 0,08244 0,00104 0,06196 0,00199 17,75 0,90			
5309,76544430 0,08182 0,00104 0,06430 0,00207 4,45 0,90			
5321,70851551 0,08024 0,00104 0,06460 0,00216 5,65 1,00			
5325,66237320 0,07960 0,00105 0,06479 0,00205 5,45 1,30			
5326,61457483 0,07948 0,00105 0,06378 0,00208 9,55 1,30			
5328,63743408 0,07958 0,00101 0,06403 0,00225 3,65 1,60			
5334,66358749 0,08001 0,00102 0,06579 0,00214 14,05 1,30			
5336,78989062 0,07974 0,00106 0,06736 0,00195 5337,65472672		5,05	1,00
0,08076 0,00104 0,06753 0,00205 5349,63633994 0,08021 0,00108 0		7,25	1,40
.06629 0,00220 5353,57755608 0,07966 0,00106 0,06567 0,00186		3,85	3,00
11,25 1,30			
5354,60680719 0,08016 0,00103 0,06506 0,00193 16,35 1,30			
5355,53696386 0,08052 0,00107 0,06516 0,00188 1,15 1,30			
5359,56247042 0,08126 0,00107 0,06532 0,00192 7,75 1,20			
5370,57817460 0,07979 0,00107 0,05973 0,00367 11,45 2,00			
5372,55365945 0,08066 0,00114 0,06559 0,00213 12,65 1,50			
5373,60233934 0,08073 0,00109 0,06293 0,00203 11,75 1,20			
5374,61617082 0,08046 0,00105 0,06330 0,00205 2,35 1,50			
5375,55662662 0,08059 0,00106 0,06410 0,00205 9,45 1,40			
5389,64755703 0,08043 0,00110 0,06209 0,00202 11,95 1,50			

Таблиц а 53 (продолжение)

BJD - 2 450 000 IHa RV (m/c)	$\sigma$ RV (M/c)	-----	$\sigma$ ID
5390,54432217	0,08028	0,00113	0,04905 0,00302 4,65 4,70
5391,54670272	0,08079	0,00103	0,06603 0,00196 13,25 1,40
5396,49708365	0,08000	0,00106	0,06604 0,00229 8,45 2,10
5399,54016828	0,08106	0,00107	0,06579 0,00188 18,65 1,30
5401,52230318	0,08054	0,00109	0,06352 0,00227 0,25 1,70
5407,49699247	0,08095	0,00106	0,06430 0,00194 11,35 1,00
5408,50167800	0,08073	0,00103	0,06331 0,00221 5,05 1,90
5410,55603221	0,08142	0,00113	0,06728 0,00188 16,85 1,20
5411,51484151	0,08386	0,00108	0,06561 0,00195 5423,51170893 8,75 1,50
0,08197	0,00108	0,06384 0,00207	11,05 1,10
5427,49845525	0,08560	0,00108	0,06499 0,00194 5428,48093062 8,55 1,10
0,08305	0,00106	0,06267 0,00215	4,75 1,30
5434,51127301	0,08306	0,00106	0,06361 0,00205 15,65 1,20
5435,48704963	0,08317	0,00107	0,06207 0,00208 11,65 1,00
5436,48340340	0,08284	0,00106	0,06282 0,00214 3,65 0,90
5437,51431457	0,08276	0,00109	0,06251 0,00209 14,85 0,90
5439,48708402	0,08228	0,00109	0,06168 0,00215 9,55 1,00
5443,49985669	0,08275	0,00115	0,06197 0,00239 2,95 2,10
5444,48950218	0,08236	0,00108	0,05653 0,00305 10,55 1,10
5445,49327897	0,08190	0,00108	0,06341 0,00224 21,95 1,20
5450,48002349	0,08130	0,00108	0,06307 0,00216 10,35 1,40
5453,48660148	0,08145	0,00112	0,06394 0,00219 14,85 1,20
5454,47679838	0,08125	0,00105	0,06584 0,00238 4,15 1,40
5455,48896200	0,08098	0,00109	0,06401 0,00214 9,45 1,30
5457,47396646	0,08089	0,00106	0,06624 0,00201 4,35 1,00
5458,48996366	0,08064	0,00108	0,06546 0,00209 6,65 1,30
5464,48161306	0,08033	0,00107	0,06409 0,00222 16,45 1,70
5626,90847403	0,07998	0,00107	0,06121 0,00208 3,85 1,70
5627,86993694	0,08031	0,00108	0,06323 0,00210 16,65 1,20
5629,88249802	0,08046	0,00105	0,06304 0,00194 7,15 1,00
5630,88944867	0,08065	0,00106	0,06230 0,00209 14,55 1,20
5633,83855319	0,07954	0,00105	0,06280 0,00197 11,05 0,90
5634,83780289	0,08131	0,00105	0,06303 0,00202 1,45 1,10
5635,80037040	0,08145	0,00104	0,06229 0,00205 14,95 1,40
5638,87580215	0,08186	0,00105	0,06353 0,00202 13,95 1,10
5639,82564487	0,08131	0,00105	0,06120 0,00201 8,45 1,00
5641,85816153	0,08086	0,00103	0,06407 0,00200 9,75 1,00
5642,78864791	0,08168	0,00105	0,06322 0,00208 0,75 1,20
5644,87267782	0,08130	0,00105	0,06306 0,00206 5,45 1,10
5646,85118609	0,08075	0,00105	0,06294 0,00209 12,95 1,20
5647,86059610	0,08116	0,00103	0,06037 0,00206 1,85 1,00
5648,89759932	0,08162	0,00101	0,06159 0,00198 9,95 1,10
5652,83977562	0,08195	0,00105	0,06204 0,00200 3,75 1,10
5653,72223734	0,08276	0,00104	0,06077 0,00195 8,65 1,10

Таблиц а S3 (продолжение)

BJD - 2 450 000 IHa RV (м/с)	$\sigma$ RV (м/с)	тривет	-----	сiD
5654,68243413	0,08150	0,00104	0,06293	0,00194 15,85 1,10
5656,75878190	0,08220	0,00103	0,06070	0,00205 6,15 1,00
5657,76630370	0,08153	0,00103	0,06208	0,00206 14,25 1,10
5658,82034278	0,08213	0,00104	0,06020	0,00214 4,65 1,50
5662,76574096	0,08131	0,00105	0,06225	0,00224 14,55 1,40
5663,75875103	0,08150	0,00106	0,05926	0,00294 7,25 3,00
5672,71848380	0,08133	0,00103	0,06147	0,00205 8,25 1,20
5674,73186887	0,08108	0,00103	0,06185	0,00204 3,35 1,00
5675,77838073	0,08134	0,00109	0,06366	0,00214 12,15 1,30
5676,75948402	0,08059	0,00106	0,06384	0,00212 9,05 1,40
5677,69188083	0,08090	0,00106	0,06324	0,00228 3,75 1,50
5678,76651339	0,08143	0,00109	0,06323	0,00216 5679,71364130 0,08148 11,25 1,50
0,00105	0,06345	0,00206	6,45	0,90
5680,62401932	0,08091	0,00108	0,06332	0,00210 -2,15 1,30
5681,67630837	0,08351	0,00105	0,06415	0,00196 12,95 1,00
5682,67266874	0,08165	0,00107	0,06284	0,00209 -2,25 1,00
5683,62142257	0,08130	0,00104	0,06412	0,00205 13,45 1,00
5684,67392635	0,08185	0,00104	0,06160	0,00199 14,35 1,10
5685,64645049	0,08160	0,00105	0,06368	0,00205 1,55 0,90
5686,65353361	0,08118	0,00104	0,06292	0,00217 7,25 1,40
5689,71145134	0,08181	0,00105	0,05293	0,00430 12,55 1,30
5690,73996295	0,08166	0,00108	0,06031	0,00204 1,15 1,60
5691,69250044	0,08241	0,00105	0,06247	0,00209 11,95 1,40
5692,71193460	0,08201	0,00108	0,06362	0,00202 12,75 1,20
5693,75657536	0,08151	0,00105	0,06438	0,00196 -2,25 1,00
5695,62766961	0,08210	0,00104	0,06189	0,00203 12,15 0,90
5711.55591366	0.08252	0.00123	0.06046	0.00468 5749.54860147 0.08002 --- ---
0.00104	0.06499	0.00209	5754.63524961	0.07902 0.00106 0 .07108 0,00221 --- ---
				--- ---