

УДК 524.3-17:524.3-56

АКТИВНОСТЬ КАРЛИКА КЛАССА К HIP 113103 И АТМОСФЕРНЫЕ ПОТЕРИ ЕГО ЭКЗОПЛАНЕТ

© 2024 И. С. Саванов^{1*}¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 19 ноября 2023 года; после доработки 13 декабря 2023 года; принята к публикации 18 декабря 2023 года

Представлены результаты анализа проявлений активности карлика спектрального класса K3V HIP 113103 (HD 216530) и выполнены оценки потери вещества атмосфер двух его планет. HIP 113103 можно отнести к сравнительно молодым объектам с возрастом порядка 470 млн лет – 1 млрд лет. По стандартной методике по данным наблюдений миссии TESS нами были оценены площади пятен на поверхности звезды, которые превосходят максимальную площадь пятен на Солнце и составляют 6100 и 4950 м.д.п. для секторов 1 и 28 соответственно. По данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey установлены циклы активности HIP 113103 длительностью порядка 610, 825 и 1030 суток (1.7, 2.3 и 2.8 лет соответственно). Обе планеты в системе звезды HIP 113103 представляют собой объекты с радиусами $1.829 R_{\oplus}$ и $2.400 R_{\oplus}$, с периодами 7.6 и 14.2 суток соответственно, на диаграмме «период – радиус» лежащие по разные стороны провала Фултона. Подсчет потери вещества атмосферами планет выполнен по аппроксимационной формуле, соответствующей модели потери атмосферы с ограничением по энергии. Для оценки величины потока XUV-фотонов применялись аналитические зависимости, связывающие величины потока и параметр $\lg R'_{\text{HK}}$. Найдено, что значения \dot{M} для планет b и c равны $2.8 \times 10^8 \text{ г с}^{-1}$ и $1.9 \times 10^8 \text{ г с}^{-1}$ соответственно. Планета HIP 113103 b привлекает особое внимание, поскольку при ее радиусе $R_p = 1.829 R_{\oplus}$ она принадлежит к небольшой популяции планет с радиусами $1.5 R_{\oplus} < R_p < 2.0 R_{\oplus}$, по свойствам которых можно судить о различиях в формировании между суперземлями и мининептунами. HIP 113103 c имеет радиус $R_p = 2.40 R_{\oplus}$ и равновесную температуру $585 \pm 10 \text{ К}$, что характеризует объект как уже состоявшийся теплый мининептун. Сопоставление свойств планет b и c представляет интерес, поскольку они принадлежат одной системе, облучаются одной звездой, имеют, вероятно, схожие возраст, условия образования и т.п.

Ключевые слова: *методы: анализ данных — звезды: активные — звезды: маломассивные — экзопланеты*

1. ВВЕДЕНИЕ

Lowson et al. (2024) сообщили об обнаружении системы вокруг молодой K-звезды HIP 113103 (TIC 121490076), которая состоит из двух планет на орбитах, близких к резонансным 2:1 ($P = 7^{\text{d}}610303$ для HIP 113103 b и $P = 14^{\text{d}}245651$ для HIP 113103 c). Планетная система была впервые идентифицирована в ходе миссии TESS¹ и подтверждена дополнительными фотометрическими и спектроскопическими наблюдениями, включающими транзиты обеих планет в течение 17.5 часов, миссий CHEOPS². Имея радиус $1.829 R_{\oplus}$, HIP 113103 b на диаграмме «период – радиус»

находится на границе провала Фултона (Fulton et al., 2017). Изучение этой экзопланеты может предоставить ценную информацию о различиях в формировании между суперземлями и мининептунами. Вполне вероятно, что HIP 113103 b потеряла (или все еще теряет) свою первичную атмосферу. Обладая бóльшим радиусом $R_p = 2.40 R_{\oplus}$, HIP 113103 c находится выше провала Фултона. Учитывая непосредственную близость обеих планет к HIP 113103, Lowson et al. (2024) пришли к выводу о том, что они представляют большой интерес для дальнейших исследований методом трансмиссионной спектроскопии с использованием телескопов JWST и HST. HIP 113103 b и c принадлежат к числу одних из самых ярких планетарных систем с несколькими субнептуновыми объектами, подходящими для наблюдения их атмосфер, и, несомненно, могут дать представление об эволюции планет для популяции K-звезд.

*E-mail: isavanov@inasan.ru

¹<https://tess.mit.edu/>²https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Cheops

Цель нашего исследования состоит в изучении проявлений активности звезды HIP 113103 и оценке потери вещества атмосфер ее планет.

2. ВРАЩЕНИЕ И АКТИВНОСТЬ HIP 113103

Lowson et al. (2024) представили основные данные о звезде HIP 113103 (HD 216530, TIC 121490076) и ее планетах. Объект достаточно яркий, его блеск составляет:

$$TESS = 8^m9988 \pm 0^m0063,$$

$$B = 10^m907 \pm 0^m033, V = 9^m95 \pm 0^m03.$$

Согласно данным из таблицы 3 в работе Lowson et al. (2024), эффективная температура звезды равна $T_{\text{eff}} = 4930 \pm 100$ К, ускорение силы тяжести $\lg g = 4.6 \pm 0.1$, радиус $R = 0.742 \pm 0.013 R_{\odot}$, масса $M = 0.761 \pm 0.038 M_{\odot}$. Возраст звезды, по оценке Lowson et al. (2024), равен 470^{+170}_{-110} млн лет.

Период вращения звезды достаточно хорошо установлен — $P_{\text{rot}} = 9.92 \pm 0.23$ суток (Lowson et al., 2024). На основе методики, представленной в Boima et al. (2023), и указанной величине P_{rot} были выполнены определения возраста звезды. Достаточно быстрое вращение и умеренные проявления хромосферной активности (см. ниже) свидетельствуют, что HIP 113103 все же можно отнести к сравнительно молодым объектам с возрастом 470 млн лет. Отметим, что приведенные в Lowson et al. (2024) дополнительные оценки указывают, что возраст HIP 113103, в принципе, может и превосходить 1 млрд лет. Объект отождествлен с источником Gaia EDR3 6541360574788758016, его параллакс $\pi = 21.6179 \pm 0.0148$ миллисекунд дуги.

В архиве миссии TESS содержатся результаты наблюдений HIP 113103 в двух секторах — 1 и 28. Lowson et al. (2024) представили кривые блеска звезды (см. рис. 1), характеризующиеся переменностью, вызванной вращательной модуляцией вследствие наличия холодных пятен на поверхности.

Lowson et al. (2024) выполнили углубленный анализ кривых блеска объекта из архива миссии TESS. На построенных ими спектрах мощности по данным двух секторов наблюдений имеется доминирующий пик (см. рис. 8 указанной работы), соответствующий периоду около 10 суток. Более точное определение ($P_{\text{rot}} = 9.92 \pm 0.23$ суток) было найдено Lowson et al. (2024) по данным архива WASP (см. подробности в статье), полученным примерно на десятилетие раньше наблюдений TESS. По мнению авторов, это свидетельствует о постоянстве величины P_{rot} на длительном интервале времени.

Форма кривой блеска, полученной по наблюдениям TESS, претерпевает незначительные изменения. Savanov (2018; 2023) провел анализ фотометрических данных с помощью модифицированной программы *activity*. Используя применяемый нами ранее подход, мы установили, что доля поверхности HIP 113103, занимаемая пятнами, равна 1.5% и 1.2% от видимой площади поверхности звезды, что при принятой в работе Lowson et al. (2024) величине радиуса звезды составляет в абсолютной величине A (выраженной в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.) 6100 и 4950 м.д.п. для секторов 1 и 28 соответственно. По нашей оценке, площадь пятен на поверхности HIP 113103 превосходит величину A , характерную для Солнца, но сопоставима с ее максимальными значениями.

Как показывает наш опыт работы с кривыми блеска архива TESS (Savanov, 2021), поиск долговременной периодичности (большой по продолжительности интервала наблюдений в секторе), вследствие малой амплитуды переменности блеска, отсутствия непрерывности ряда, трудности снятия долговременных инструментальных трендов и т. д., не позволяет говорить о достоверных оценках возможных циклов активности P_{cycl} . По этой причине оценка возможных величин P_{cycl} для HIP 113103 была проведена по данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey (ASAS). Всего было рассмотрено 826 оценок блеска звезды в фильтре V . Представленные на рис. 1а данные свидетельствуют о возможном присутствии цикличности в изменении блеска звезды. Не исключено, что величина одного из возможных циклов превосходит длительность наблюдений обзора (широкий пик около 3800 суток). На основе построенного спектра мощности можно предположить существование возможных циклов активности около 610, 825 и 1030 суток (1.7, 2.3 и 2.8 лет соответственно) (рис. 1б).

Lowson et al. (2024) определили величины параметра хромосферной активности S' звезды по наблюдениям со спектрографом HARPS. По общепринятым методикам был осуществлен перевод величин этого параметра в индексы $\lg R'_{\text{HK}}$ (см. подробности процедуры и обсуждение в Lowson et al., 2024). На рис. 2 приводится диаграмма зависимости параметра $\lg R'_{\text{HK}}$ от показателя цвета $(B - V)$. Черным кружком отмечены данные для HIP 113103 ($\lg R'_{\text{HK}} = -4.69$), светлыми — данные каталога Vого Saikia et al. (2018). Горизонтальная линия соответствует значению параметра $\lg R'_{\text{HK}}$ для Солнца в спокойном состоянии. Можно сделать вывод о том, что уровень хромосферной активности HIP 113103 сопоставим со средней величиной, характерной для других холодных карли-

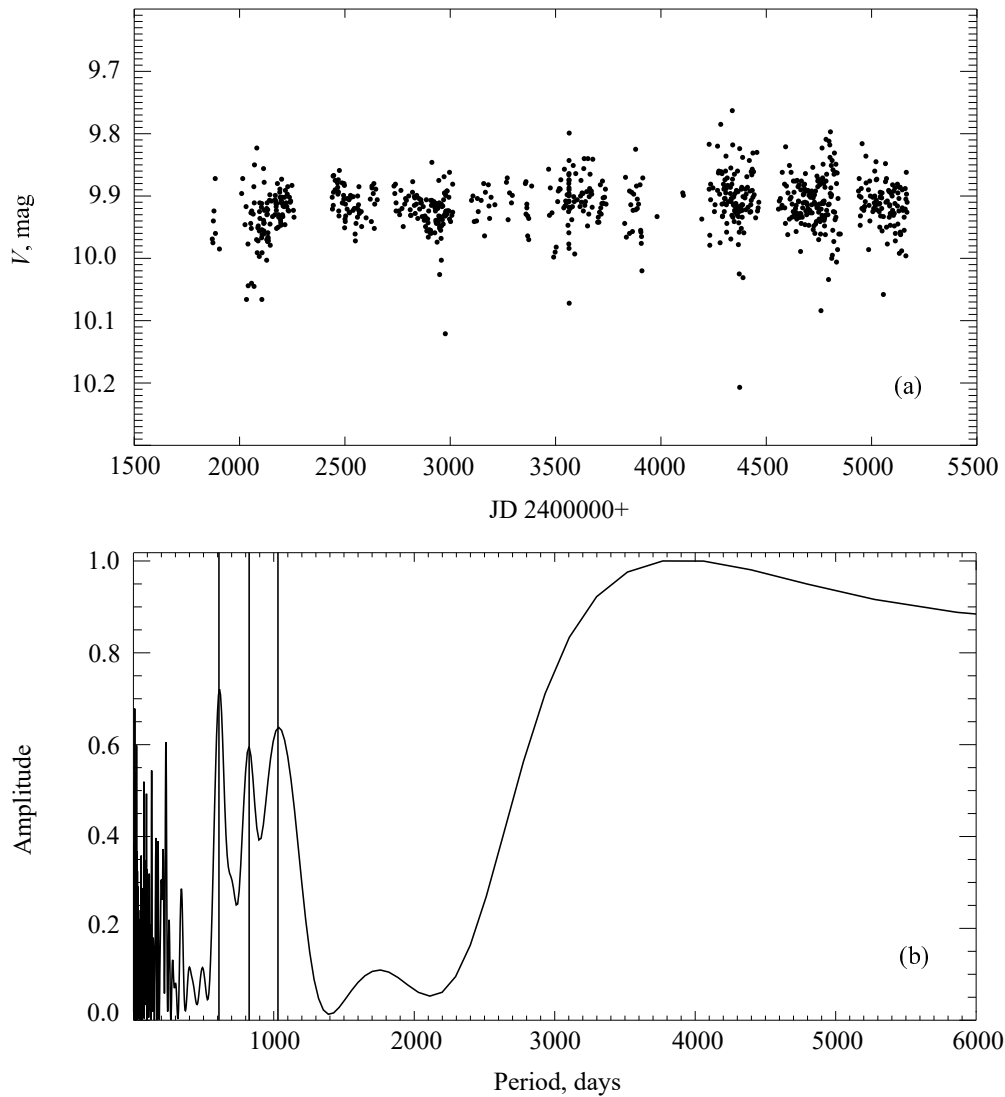


Рис. 1. Панель (a) — кривая блеска HIP 113103 по данным из архива наблюдений All Sky Automated Survey. Панель (b) — спектр мощности для диапазонов периодов 1–6000 суток. Вертикальными линиями отмечены циклы продолжительностью 610, 825 и 1030 суток (1.7, 2.3 и 2.8 лет соответственно).

ков с аналогичными значениями показателя цвета $B - V$. Кроме того, этот уровень выше солнечного: средняя величина параметра для HIP 113103 составляет $\lg R'_{\text{HK}} = -4.69$, в то время как для Солнца — $\lg R'_{\text{HK}} = -5.021$ (Boro Saikia et al., 2018).

3. ПОТЕРЯ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕР ПЛАНЕТАМИ СИСТЕМЫ HIP 113103

Основные данные о планетах HIP 113103 b и c приведены в работе Lawson et al. (2024, см. таблицу 4). Эти данные и сведения о родительской звезде и ее активности (см. раздел 2) были использованы нами при оценке величины оттока вещества из атмосфер планет.

Для подсчета потери вещества атмосферами планет (без детального моделирования процессов в системе «звезда – планета») нами была применена аппроксимационная формула (см., например, Erkaev et al., 2007; Koskinen et al., 2022), соответствующая модели потери атмосферы с ограничением по энергии. В ней предполагается, что поток жесткого УФ-излучения поглощается в тонком слое радиуса R_{XUV} с оптической толщиной для звездных XUV-фотонов, равной единице, а также включен учет приливного эффекта:

$$\dot{M} = \frac{\epsilon_{\text{XUV}} \pi F_{\text{XUV}} R_p R_{\text{XUV}}^2}{GM_p K_{\text{tide}}(\xi)}, \quad (1)$$

где ϵ_{XUV} — параметр эффективности нагрева ($\epsilon_{\text{XUV}} = 0.2 \pm 0.1$ для мининептунов и суперзе-

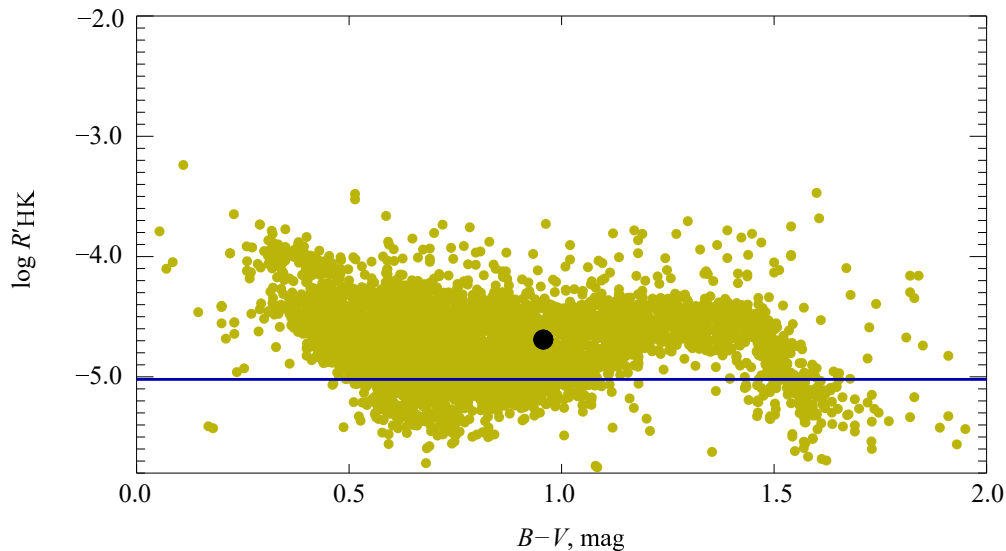


Рис. 2. Диаграмма « $\lg R'_{\text{HK}} - (B - V)$ ». Темный кружок — данные для HIP 113103, светлые — данные каталога Вого Saikia et al. (2018), горизонтальная линия соответствует значению параметра $\lg R'_{\text{HK}}$ для Солнца в спокойном состоянии.

мель); G — гравитационная постоянная; F_{XUV} — поток XUV-фотонов; R_p — радиус планеты; M_p — масса планеты; R_{XUV} — радиус поглощения XUV-фотонов; $K_{\text{tide}}(\xi)$ — приливный параметр.

Подробности использования соотношения (1) можно найти во многих литературных источниках, в том числе в Erkaev et al. (2007), Savanov and Shematovich (2021), Koskinen et al. (2022), Kalinicheva et al. (2022).

Для вычислений по формуле (1) необходимы оценки величины потока XUV-фотонов F_{XUV} . С этой целью были использованы аналитические зависимости Sreejith et al. (2020) и связывающие величины F_{XUV} потока и параметра $\lg R'_{\text{HK}}$ для звезд спектральных классов от F до M. Как указывалось выше, HIP 113103 является умеренно-активной медленно вращающейся звездой с возрастом, вероятно, выше 470 млн лет. Средняя величина показателя звездной хромосферной активности звезды, измеренного по линиям Ca II H и K, равна $\lg R'_{\text{HK}} = -4.69 \pm 0.05$. Это значение, в целом, согласуется с зависимостями, установленными по данным каталога Вого Saikia et al. (2018). В итоге можно заключить, что уровень хромосферной активности HIP 113103 сопоставим со средней величиной, характерной для других аналогичных холодных карликов.

К сожалению, в нашем распоряжении нет точных сведений о циклической переменности хромосферной активности звезды, которые могут приводить к разбросу в оценках величин $\lg R'_{\text{HK}}$. Однако, основываясь на данных о слабовыраженной переменности блеска по данным фотометрического обзора ASAS, можно предположить, что амплитуда

переменности величин $\lg R'_{\text{HK}}$ для HIP 113103 также будет невелика. Расчеты темпа оттока вещества атмосфер экзопланет в системе HIP 113103 были выполнены нами для имеющейся оценки параметра $\lg R'_{\text{HK}}$ из работы Lawson et al. (2024).

Согласно результатам Sreejith et al. (2020), нами была получена оценка величин $\lg(F_{\text{XUV}}/F_{\text{bol}})$ и, окончательно, величина потока XUV-фотонов, значение которой равно 1.1×10^{28} эрг с^{-1} . Величины приливного параметра $K_{\text{tide}}(\xi)$ равны 0.91 и 0.93 для планет HIP 113103 b и c. Окончательно было найдено, что значения \dot{M} этих планет равны 2.8×10^8 г с^{-1} и 1.9×10^8 г с^{-1} соответственно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей статье представлены результаты анализа проявлений активности HIP 113103 и выполнены оценки потери вещества атмосфер двух ее планет. Звезда спектрального класса K3V HIP 113103 ($V = 9^{\text{m}}95$) расположена от нас на расстоянии около 46 пк. Величина P_{rot} для HIP 113103 установлена достаточно надежно, по оценке Lawson et al. (2024) она составляет $P_{\text{rot}} = 9.92 \pm 0.23$ суток. HIP 113103 можно отнести к сравнительно молодым объектам с возрастом порядка 470 млн лет. Однако приведенные в работе Lawson et al. (2024) дополнительные оценки указывают, что возраст HIP 113103, в принципе, может и превосходить 1 млрд лет.

Для HIP 113103 в архиве TESS имеются данные двух сетов наблюдений (1 и 28). По стандартной методике нами были оценены площади пятен на поверхности звезды, которые превосходят

максимальную площадь пятен на Солнце и составляют 6100 и 4950 м.д.п. для секторов 1 и 28 соответственно. Оценка долговременных циклов активности HIP 113103 была проведена по данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey. Установлены циклы активности длительностью порядка 610, 825 и 1030 суток (1.7, 2.3 и 2.8 лет соответственно).

Обе планеты в системе звезды HIP 113103 характеризуются как объекты с радиусами $1.829 R_{\oplus}$ и $2.400 R_{\oplus}$, с периодами 7.6 и 14.2 суток соответственно. Для подсчета потери вещества атмосферами планет в нашем исследовании использовалась аппроксимационная формула, соответствующая модели потери атмосферы с ограничением по энергии. Для оценки величины потока XUV-фотонов применялись аналитические зависимости, связывающие величины потока и параметр $\lg R'_{\text{HK}}$. Установлено, что значения \dot{M} для планет HIP 113103 b и c равны $2.8 \times 10^8 \text{ г с}^{-1}$ и $1.9 \times 10^8 \text{ г с}^{-1}$ соответственно.

Найденные высокие значения темпа оттока вещества могут являться следствием достаточно высокого уровня потока XUV-фотонов от сравнительно молодой родительской звезды, а также довольно близкого расположения планет от нее.

Планета HIP 113103 b привлекает особое внимание, поскольку при ее радиусе $R_p = 1.829^{+0.096}_{-0.067} R_{\oplus}$ она принадлежит к небольшой популяции планет с радиусами $1.5 R_{\oplus} < R_p < 2 R_{\oplus}$, которая отражает различия в формировании между суперземлями и мининептунами из-за потери массы, вызванной фотоиспарением (Fulton et al., 2017). HIP 113103 c имеет радиус $R_p = 2.40^{+0.10}_{-0.08} R_{\oplus}$ и равновесную температуру $585 \pm 10 \text{ К}$, что характеризует объект как уже состоявшийся теплый мининептун. В связи с этим сопоставление свойств планет b и c представляет интерес, поскольку они принадлежат одной системе, облучаются одной звездой, имеют, вероятно, схожие возраст и условия образования и прочее.

БЛАГОДАРНОСТИ

В настоящей работе использовались сведения из астрономической базы данных SIMBAD и архива космической миссии TESS.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках проекта «Исследование звезд с экзопланетами» по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашение № 075-15-2019-1875, № 075-15-2022-1109).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Boro Saikia, C. J. Marvin, S. V. Jeffers, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A108 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201629518
2. L. G. Bouma, E. K. Palumbo, and L. A. Hillenbrand, *Astrophys. J.* **947** (1), id. L3 (2023). DOI:10.3847/2041-8213/acc589
3. N. V. Erkaev, Y. N. Kulikov, H. Lammer, et al., *Astron. and Astrophys.* **472** (1), 329 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20066929
4. B. J. Fulton, E. A. Petigura, A. W. Howard, et al., *Astron. J.* **154** (3), article id. 109 (2017). DOI:10.3847/1538-3881/aa80eb
5. E. S. Kalinicheva, V. I. Shematovich, and I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **66** (12), 1318 (2022). DOI:10.1134/S1063772922110087
6. T. T. Koskinen, P. Lavvas, C. Huang, et al., *Astrophys. J.* **929** (1), id. 52 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/ac4f45
7. N. Lowson, G. Zhou, C. X. Huang, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **527** (1), 1146 (2024). DOI:10.1093/mnras/stad2756
8. I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **62** (11), 814 (2018). DOI:10.1134/S1063772918110057
9. I. S. Savanov, *Astrophysics* **64** (2), 178 (2021). DOI:10.1007/s10511-021-09679-y
10. I. S. Savanov and V. I. Shematovich, *Astrophysical Bulletin* **76** (4), 450 (2021). DOI:10.1134/S199034132104012X
11. I. S. Savanov, *Astrophysical Bulletin* **78** (2), 200 (2023). DOI:10.1134/S1990341323020086
12. A. G. Sreejith, L. Fossati, A. Youngblood, et al., *Astron. and Astrophys.* **644**, id. A67 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/202039167

Activity of K-Dwarf HIP 113103 and Atmospheric Losses of its Exoplanets

I. S. Savanov¹

¹Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

We present the results of analyzing the activity manifestations of the K3 V spectral type dwarf HIP 113103 (HD 216530) and estimate the matter loss from the atmospheres of two of its planets. HIP 113103 can be classified as a relatively young object with an age of about 470 million years – 1 billion years. Using the standard method, based on the observed data from the TESS mission, we estimated the areas of spots on the surface of the star, which exceed the maximum area of spots on the Sun and are 6100 and 4950 MSH for sectors 1 and 28, respectively. According to the data from the observation archive of the All Sky Automated Survey, the activity cycles of HIP 113103 have been established to last about 610, 825, and 1030 days (1.7, 2.3, and 2.8 years, respectively). Both planets in the stellar system HIP 113103 are characterized as objects with radii of $1.829R_{\oplus}$ and $2.400R_{\oplus}$, with periods of 7.6 and 14.2 days, respectively, lying on opposite sides of the Fulton Gap in the “Period – Radius” diagram. The loss of matter from the planetary atmospheres was calculated using an approximation formula corresponding to the energy-limited atmospheric loss model. To estimate the flux of XUV photons, analytical dependences were used connecting flux values and the $\log R'_{\text{HK}}$ parameter. It was found that the \dot{M} values for planets b and c are equal to $2.8 \times 10^8 \text{ g s}^{-1}$ and $1.9 \times 10^8 \text{ g s}^{-1}$, respectively. The planet HIP 113103 b attracts special attention because, with its radius $R_p = 1.829R_{\oplus}$, it belongs to a small population of planets with the radii $1.5R_{\oplus} < R_p < 2.0R_{\oplus}$, whose properties illuminate the differences in formation between super-Earths and mini-Neptunes. HIP 113103 c has the radius $R_p = 2.40R_{\oplus}$ and an equilibrium temperature of $585 \pm 10 \text{ K}$ which characterizes the object as an already established warm mini-Neptune. A comparison of the properties of planets b and c is of interest, since they belong to the same system, are irradiated by the same star, probably have similar ages and conditions of formation, etc.

Keywords: *methods: data analysis—stars: activity—stars: low-mass—exoplanets*