

УДК 524.3-17+524.3-56

# АКТИВНОСТЬ М-КАРЛИКА L 98-59 И АТМОСФЕРНЫЕ ПОТЕРИ ЕГО ЭКЗОПЛАНЕТ

© 2023 И. С. Саванов<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия<sup>1</sup>

Поступила в редакцию 26 июля 2023 года; после доработки 9 сентября 2023 года; принята к публикации 11 сентября 2023 года

Выполнены исследования активности яркого М-карлика L 98-59, расположенного на расстоянии 10.6 пк от Земли и обладающего мультипланетной системой (одна из планет L 98-59 b является каменной планетой с массой, не превосходящей массу Венеры). Найдено, что уровень хромосферной активности L 98-59 не превышает средней величины, характерной для других холодных карликов с аналогичными величинами показателя цвета ( $B - V$ ). Этот уровень ниже солнечного, средняя величина параметра  $\lg R'_{HK}$  для L 98-59 равна  $-5.297$  dex. Сведения о родительской звезде и ее активности были использованы нами при оценке величины оттока вещества из атмосфер пяти планет (в том числе кандидата в планеты 05). Для подсчета потери вещества атмосферами планет (без детального моделирования процессов в системе «звезда — планета») мы применили аппроксимационную формулу, соответствующую модели потери атмосферы с ограничением по энергии. Получены оценки величин потока XUV-фотонов — жесткого ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов — для среднего и высокого уровней активности, а также оценки величин приливного параметра  $K_{tide}(\xi)$ . Установлены изменения величины параметра  $\dot{M}$  для пяти планет системы L 98-59 с учетом возможных вариаций уровня активности звезды. Диапазоны изменений параметра  $\dot{M}$  для планет c–e составляют от  $7.6 \times 10^6 \text{ г с}^{-1}$  до  $3.8 \times 10^7 \text{ г с}^{-1}$  (средний уровень активности) и  $1.2\text{--}5.7 \times 10^7 \text{ г с}^{-1}$  (высокий уровень активности). Для планеты L 98-59 b, аналога Венеры, мы получили следующие оценки:  $1.3 \times 10^7$  и  $2.0 \times 10^7 \text{ г с}^{-1}$  (для среднего и высокого уровней активности соответственно). Можно предположить, что сравнительно небольшой, несмотря на близость планет к звезде, отток вещества их атмосфер  $\dot{M}$  обусловлен невысоким потоком XUV-фотонов от звезды вследствие низкого уровня ее активности.

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

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Появившееся в последние годы новое поколение спектрографов для определения лучевых скоростей позволяет обнаруживать планеты все меньших масс, вплоть до преодоления барьера, соответствующего величине массы Земли. Demangeon et al. (2021) сообщили об обнаружении L 98-59 b — каменной планеты, масса которой не превышает массы Венеры. В планетной системе L 98-59 три транзитные планеты земной группы (планеты b–d) (Cloutier et al., 2019; Kostov et al., 2019). Demangeon et al. (2021) объявили об открытии четвертой, не транзитной, планеты с массой около  $3.06 M_{\oplus}$  и орбитальным периодом 12.796 суток, а также о признаках присутствия еще одной планеты земной группы, с массой  $2.46 M_{\oplus}$  и периодом обращения 23.15 суток. В случае подтверждения в дальнейшем это будет планета, находящаяся в

середине обитаемой зоны системы L 98-59. Особо следует отметить то, что L 98-59 является ярким карликом класса M, расположенным на расстоянии 10.6 пк от Земли. Многопланетные системы, подобные L 98-59, бесспорно являются лабораториями для исследований широкого круга направлений: межпланетных взаимодействий, формирования и миграции планет, сравнительной планетологии и прочих. Индикаторы биологической активности на экзопланетах могут быть обнаружены при изучении их атмосфер, что в настоящее время определяется возможностями транзитной спектроскопии. Три известные транзитные планеты системы L 98-59 имеют величины TSM (transmission spectrum metrics — метрики транзитной спектроскопии, которая характеризует ожидаемое  $S/N$  при таких наблюдениях и пропорциональна шкале высот атмосферы экзопланеты и яркости звезды (см. Kempton et al., 2018)) в диапазоне от 49 до 255, что, несомненно, делает их перспективными объектами для определения характеристик атмосферы с

<sup>1</sup>E-mail: igs231@mail.ru

помощью космического телескопа Джеймса Уэбба, космического телескопа им. Хаббла и наземных наблюдений.

Цель нашей работы состоит в оценке потери вещества атмосфер планет системы L 98-59.

## 2. ВРАЩЕНИЕ И АКТИВНОСТЬ L 98-59

Основные данные о звезде L 98-59 и ее планетах приводятся в статье Demangeon et al. (2021). Согласно данным таблицы 3 (см. Приложение в указанной статье), эффективная температура звезды равна  $T_{\text{eff}} = 3415 \pm 135$  K, логарифм ускорения силы тяжести  $\lg g = 4.86 \pm 0.13$ , радиус  $R = 0.303^{+0.026}_{-0.023} R_{\odot}$ , масса  $M = 0.273 \pm 0.030 M_{\odot}$  и светимость  $L = 0.01128 \pm 0.00042 L_{\odot}$ . Возраст звезды оценить трудно, однако, как полагают Demangeon et al. (2021), звезда принадлежит тонкому диску, но кинематической связи с известными звездными ассоциациями не установлено. Сравнительно медленное вращение и отсутствие проявлений значительной хромосферной активности (см. ниже) также указывают на то, что L 98-59 A вряд ли можно отнести к молодым объектам. Приведенная Demangeon et al. (2021) оценка достаточно неопределенная — возраст более 800 млн лет. Объект отождествлен с источником Gaia EDR3 5271055243163629056, его параллакс составляет  $\pi = 94.2664 \pm 0.0155$  mas.

Период вращения звезды тоже плохо определяется, причем в таблице 3 (см. Demangeon et al., 2021) дана величина  $P_{\text{rot}} = 33^{+43}_{-19}$  км с<sup>-1</sup>. Однако, как отмечено в тексте статьи, по результатам анализа временных рядов спектральных наблюдений с приборами HARPS и ESPRESSO были определены некоторые индикаторы проявлений активности и авторам удалось оценить периодичность проделанных измерений. Во многих случаях результаты анализа указывали на величину  $P_{\text{rot}} \sim 80$  суток.

В архиве миссии TESS содержатся результаты фотометрических наблюдений исследуемого нами объекта L 98-59 (TIC 307210830, TOI-175) в 20 секторах (данные не непрерывны). Как показывает наш опыт работы с кривыми блеска архива (Kempton et al., 2018), поиск долговременной периодичности (сопоставимой с продолжительностью наблюдений в секторе), вследствие малой амплитуды переменности блеска, отсутствия непрерывности ряда, трудности снятия долговременных инструментальных трендов и прочее, не позволяет говорить о достоверных оценках величины  $P_{\text{rot}}$ . Тем не менее Demangeon et al. (2021) выполнили углубленный анализ кривых блеска из архива миссии TESS. На построенном Demangeon et al. (2021) (см. рис. 3 в указанной статье) спектре мощности по данным девяти секторов (доступных

в то время) имеются три доминирующих пика: 93, 115 и 79 суток (указаны в порядке уменьшения амплитуд).

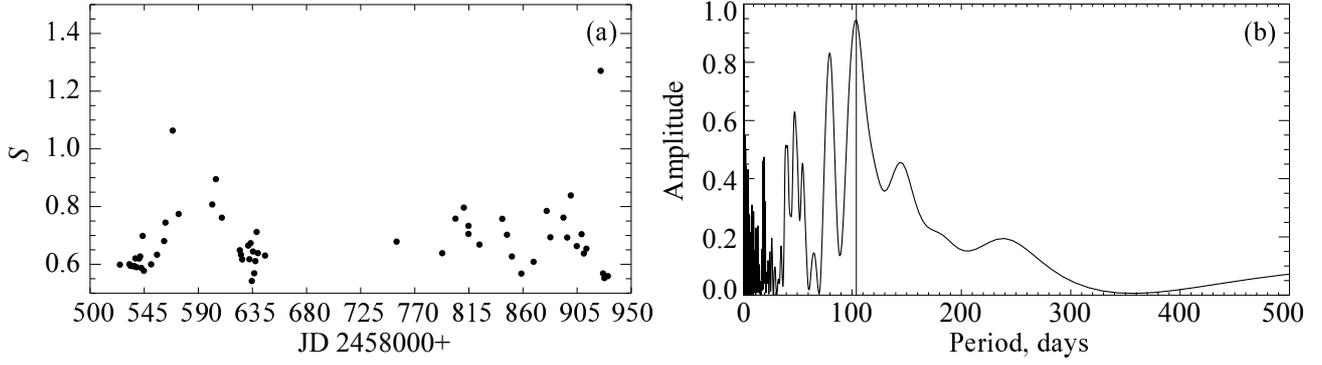
Мы отказались от рассмотрения данных из архива TESS, сконцентрировав внимание на данных об измерениях параметра хромосферной активности  $S$ , выполненных Demangeon et al. (2021). Всего было опубликовано 66 величин параметра, которые однозначно указывают на наличие переменности (рис. 1a).

Построенный нами спектр мощности свидетельствует о цикличности изменений с величинами периода порядка 104, 80 суток и набором пиков около 50 суток (рис. 1b). Следует иметь в виду, что оценки получены по данным с продолжительностью измерений менее 450 суток, неравномерно распределенными и имеющими пробелы. Трудно сделать заключение, имеет ли отношение величина  $P_{\text{rot}} \sim 104^{\text{d}}$ , соответствующая доминирующему пику на построенном нами спектре мощности, к величине  $P_{\text{rot}} = 115^{\text{d}}$ , установленной Demangeon et al. (2021) по данным архива TESS. Второй по амплитуде пик указывает на  $P_{\text{rot}} = 80^{\text{d}}$ , что совпадает с рекомендованной в работе Demangeon et al. (2021) величиной периода вращения звезды. Таким образом, даже с учетом того, что по имеющимся данным трудно сделать определенный вывод о конкретной величине  $P_{\text{rot}}$ , изучаемую нами звезду L 98-59 несомненно следует отнести к медленно вращающимся карликам.

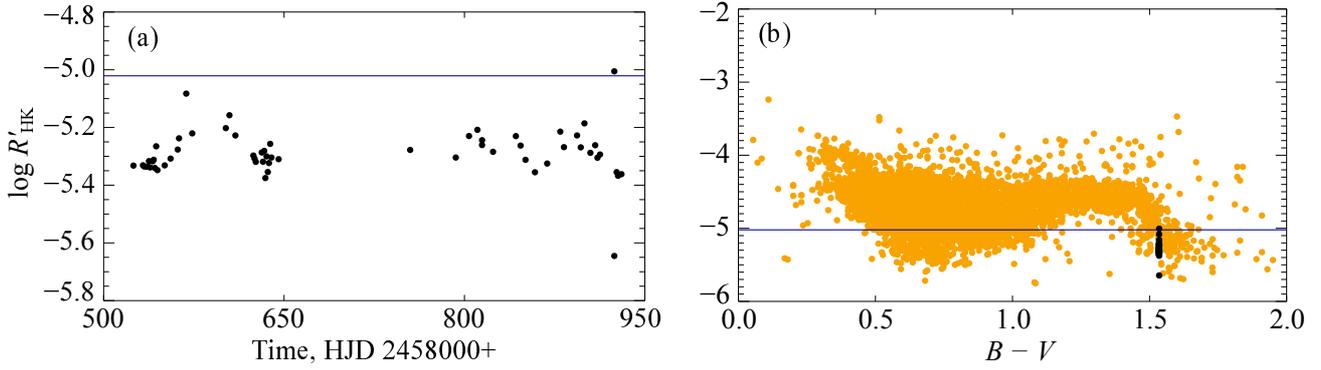
По общепринятым методикам мы осуществили для L 98-59 перевод величин параметра  $S$  в индексы  $\lg R'_{\text{HK}}$  (см. подробности процедуры и обсуждение в работе Boro Saikia et al. (2018)). Изменения индекса ее хромосферной активности  $\lg R'_{\text{HK}}$  со временем демонстрирует рис. 2a. На рис. 2b приводится диаграмма  $\lg R'_{\text{HK}}$  — показатель цвета ( $B - V$ ). Данные для L 98-59 на рис. 2 представлены темными кружками, горизонтальная линия соответствует значению параметра  $\lg R'_{\text{HK}}$  для Солнца в спокойном состоянии. Можно сделать вывод о том, что уровень хромосферной активности L 98-59 не превосходит средней величины, характерной для других холодных карликов с аналогичными величинами показателя цвета ( $B - V$ ). Кроме того, этот уровень ниже солнечного, средняя величина параметра для L 98-59  $\lg R'_{\text{HK}} = -5.297$  (для Солнца  $\lg R'_{\text{HK}} = -5.021$  (см. Boro Saikia et al., 2018)).

## 3. ПОТЕРЯ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕР ПЛАНЕТАМИ СИСТЕМЫ L 98-59

Оценивая величину оттока вещества из атмосфер планет, мы использовали приведенные в таблице Н.1 Приложения к статье Demangeon et al.



**Рис. 1.** Панель (а) — изменения индекса хромосферной активности  $S$  со временем. Панель (б) — спектр мощности для этих данных, вертикальная линия соответствует величине в 104 суток (см. текст).



**Рис. 2.** Панель (а) — изменения индекса хромосферной активности  $\lg R'_{HK}$  со временем для L 98-59. Панель (б) — диаграмма « $\lg R'_{HK} - (B - V)$ ». Темные кружки — данные для L 98-59, светлые — данные каталога Voro Saikia et al. (2018), горизонтальная линия соответствует значению параметра  $\lg R'_{HK}$  для Солнца в спокойном состоянии (см. текст).

(2021) основные данные о планетах b – e и кандидате в планеты 05, а также сведения о родительской звезде и ее активности.

Для подсчета потери вещества атмосферами планет (без детального моделирования процессов в системе «звезда – планета») нами была применена аппроксимационная формула (см. Erkaev et al., 2007; Koskinen et al., 2022), часто рассматриваемая как модель 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:

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

где  $\epsilon_{XUV}$  — параметр эффективности нагрева ( $\epsilon_{XUV} = 0.2 \pm 0.1$  для мини-нептунов и суперземель);  $G$  — гравитационная постоянная;  $F_{XUV}$  — поток XUV-фотонов;  $R_p$  — радиус планеты;  $M_p$  — масса планеты;  $R_{XUV}$  — радиус поглощения XUV-фотонов;  $K_{tide}(\xi)$  — приливный параметр.

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

Для вычислений по формуле (1) требуются оценки величины потока XUV-фотонов  $F_{XUV}$ . Мы воспользовались аналитическими зависимостями, полученными Sreejith et al. (2020) и связывающими величины  $F_{XUV}$  потока и параметра  $\lg R'_{HK}$  для звезд спектральных классов от F до M. Как указывалось выше, L 98-59 является достаточно малоактивной, медленно вращающейся звездой с возрастом, вероятно, свыше 800 млн лет. Средняя величина показателя звездной хромосферной активности звезды — индекса  $\lg R'_{HK}$ , измеренного по линиям Ca II H и K, равна  $-5.297 \pm 0.03$ . Это значение в целом согласуется с зависимостями, установленными по данным каталога Voro Saikia et al. (2018), и с заключением о том, что уровень хромосферной активности L 98-59 не превосходит средней величины, характерной для других аналогичных холодных карликов. Максимальный уровень активности звезды (не считая трех измерений),

Таблица 1. Оценки параметров экзопланет системы L 98-59

Планета	$M/M_{\oplus}^*$	$R/R_{\oplus}^*$	$a^*$ , а. е.	$\lg R'_{\text{HK}}$	$\dot{M}$ , $\text{г с}^{-1}$	$K_{\text{tide}}(\xi)$
b	0.40	0.850	0.022	-5.297	$1.31144 \times 10^7$	0.783
c	2.22	1.385	0.030	-5.297	$3.75738 \times 10^7$	0.730
d	1.94	1.521	0.049	-5.297	$7.62097 \times 10^6$	0.856
e	3.06**	1.425	0.072	-5.297	$1.48967 \times 10^7$	0.843
05	2.46**	1.337	0.103	-5.297	$3.67205 \times 10^6$	0.910
b	0.40	0.850	0.022	-5.200	$2.00470 \times 10^7$	0.783
c	2.22	1.385	0.030	-5.200	$5.74362 \times 10^7$	0.730
d	1.94	1.521	0.049	-5.200	$1.16496 \times 10^7$	0.856
e	3.06**	1.425	0.072	-5.200	$2.27714 \times 10^7$	0.843
05	2.46**	1.337	0.103	-5.200	$5.61317 \times 10^6$	0.910

Примечания: \* — данные о массе планеты, ее радиусе и большой полуоси орбиты из работы Demangeon et al. (2021); \*\* — для планеты e и кандидата 05 указаны  $M \sin i$ .

вероятно, составляет величину  $\lg R'_{\text{HK}} \approx -5.20$ , т. е. выше среднего примерно на 0.1 dex (рис. 2а).

Однако следует иметь в виду, что пока в нашем распоряжении нет точных сведений о циклической переменности хромосферной активности звезды, которые могут привести к разбросу в оценках величин  $\lg R'_{\text{HK}}$ . Поэтому мы используем оценку верхнего уровня в качестве величины, указывающей на возможные изменения параметра в ходе цикла активности. Расчеты темпа оттока вещества атмосфер экзопланет в системе L 98-59 были выполнены нами для двух значений параметра  $\lg R'_{\text{HK}}$  (см. таблицу 1).

Согласно Sreejith et al. (2020), нами были получены оценки величин  $\lg(F_{\text{XUV}}/F_{\text{bol}})$  и, окончательно, величин потока XUV-фотонов. Они составили  $2.95 \times 10^{25}$  эрг с<sup>-1</sup> и  $4.51 \times 10^{25}$  эрг с<sup>-1</sup> для среднего и высокого уровней активности соответственно. Величины приливного параметра  $K_{\text{tide}}(\xi)$  лежат в интервале 0.73–0.91. Максимальное значение  $\dot{M}$  достигается в случае планеты L 98-59 с.

Данные таблицы 1 демонстрируют изменения оценок параметра  $\dot{M}$  для пяти планет системы L 98-59 (включая планету 05, существование которой требует подтверждения) с учетом возможных изменений уровня активности звезды.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многопланетные системы являются идеальными лабораториями для экзопланетологии, поскольку они предоставляют уникальную возможность сравнения экзопланет, которые сформировались в одном и том же протопланетном диске и освещаются одной и той же звездой. Согласно архиву

экзопланет<sup>1)</sup>, в настоящее время нам известно порядка 800 многопланетных систем. Большая часть из них (60%) была обнаружена в ходе исследований космическим телескопом Кеплер. Используя подробные характеристики и результаты анализа свойств многопланетных систем по данным архива телескопа Кеплер, Weiss et al. (2018) изучили так называемую конфигурацию экзопланет «горошины в стручке» («peas in a pod») и пришли к заключению, что последовательные планеты в одной и той же системе, как правило, имеют большую вероятность обладать подобными размерами. Планеты, по-видимому, расположены на предпочтительно регулярном расстоянии друг от друга. Weiss et al. (2018) также отметили, что чем меньше планеты, тем плотнее их орбитальная конфигурация. По оценкам, выполненным ими Demangeon et al. (2021) заключили, что система L 98-59 точно повторяет конфигурацию «горошины в стручке». Следует отметить, что у большинства систем в выборке Weiss et al. (2018) центральные звезды имеют спектральный класс F–G–K. Например, в выборке Weiss et al. (2018) ни одна из 51 звезд, у которой есть четыре или более планет, не имеет массы ниже  $0.6 M_{\odot}$ . Тот факт, что система L 98-59 повторяет конфигурацию «горошины в стручке», также указывает на универсальность этой конфигурации и ограничения, которые накладываются на теорию формирования планет. Единственная тенденция, выявленная Weiss et al. (2018), которой, по мнению Demangeon et al. (2021), система L 98-59 не соответствует, связана с корреляцией между различиями равновесных температур следующих

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

друг за другом планет и отношением их радиусов. Кроме того, при величине  $v_e \sin i = 1 \text{ км с}^{-1}$ , полуамплитуда ожидаемого эффекта Росситера — Маклафлина должна составить  $40 \text{ см с}^{-1}$ ,  $1 \text{ м с}^{-1}$  и  $37 \text{ м с}^{-1}$  для планет b, c и d соответственно. Такие амплитуды, по крайней мере, для планет c и d, находятся в пределах точности регистрации в наблюдениях со спектрографами высокого разрешения, например, таких как ESPRESSO. Эта информация дала бы нам доступ к оценкам величины спин-орбитального угла в исследуемой системе, что предоставило бы еще больше сведений об ее архитектуре, возможных механизмах ее формирования и миграции планет.

В планетной системе L 98-59 Cloutier et al. (2019) нашли три транзитных планеты земной группы (планеты b–d). Demangeon et al. (2021) уточнили величину массы планеты b (ранее известной только как оценка) — при полуамплитуде изменений лучевой скорости, равной  $0.46 \pm 0.20 \text{ м с}^{-1}$ , масса планеты составит  $0.40 \pm 0.16 M_{\oplus}$  (масса планеты типа Венеры). Они также расширили представление об этой системе открытием четвертой планеты и кандидата 05. Эти планеты не транзитные, но при минимальных массах  $3.06 \pm 0.37 M_{\oplus}$  и  $2.46 \pm 0.82 M_{\oplus}$  соответственно (как и везде мы указываем лишь максимальную величину погрешности), вероятно, они обе являются каменистыми планетами или водными мирами (также называемыми мирами океанов). При равновесной температуре  $285 \pm 18 \text{ К}$  кандидат 05, в случае подтверждения, будет вращаться в обитаемой зоне своей родительской звезды.

В нашей работе было выполнено исследование проблем, связанных с установлением величины периода вращения звезды и проявлений ее хромосферной активности. Найдено, что уровень хромосферной активности L 98-59 не превосходит средней величины, характерной для других холодных карликов с аналогичными величинами показателя цвета ( $B - V$ ). Этот уровень ниже солнечного, для L 98-59 средняя величина параметра  $\lg R'_{\text{HK}} = -5.297 \text{ dex}$ . Данные Demangeon et al. (2021) и сведения о родительской звезде и ее активности 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 применялась аппроксимационная формула, соответствующая модели потери атмосферы с ограничением по энергии. Получены оценки величин потока XUV-фотонов, которые составили  $2.95 \times 10^{25} \text{ эрг с}^{-1}$  и  $4.51 \times 10^{25} \text{ эрг с}^{-1}$  для

среднего и высокого уровней активности соответственно, а также оценки величин приливного параметра  $K_{\text{tide}}(\xi)$ . Наконец, были установлены изменения оценок параметра  $\dot{M}$  для пяти планет системы L 98-59 (включая планету 05, существование которой требуется подтвердить) с учетом возможных изменений уровня активности звезды. Величина оттока массы  $\dot{M}$  для планет c–e меняется в диапазоне от  $7.6 \times 10^6 \text{ г с}^{-1}$  до  $3.8 \times 10^7 \text{ г с}^{-1}$  для среднего уровня активности и от  $1.2 \times 10^7 \text{ г с}^{-1}$  до  $5.7 \times 10^7 \text{ г с}^{-1}$  при высоком уровне хромосферной активности. Для планеты L 98-59 b (аналога Венеры) мы получили следующие оценки параметра  $\dot{M}$ :  $1.3 \times 10^7 \text{ г с}^{-1}$  и  $2.0 \times 10^7 \text{ г с}^{-1}$  (для среднего и высокого уровней активности соответственно). Можно предположить, что сравнительно небольшой отток вещества атмосфер планет  $\dot{M}$ , вероятно, обусловлен (несмотря на близость планет к звезде) невысоким потоком XUV-фотонов от звезды вследствие низкого уровня ее активности.

Возвращаясь к планете b (возможному аналогу Венеры), можно отметить, что, как указывают Demangeon et al. (2021) и другие авторы (см. Menf et al., 2023), понимание физических характеристик Венеры, включая ее атмосферу, внутренний состав и ход эволюционного развития, остается важным компонентом при моделировании эволюции планет земной группы и условий возникновения и/или снижения пригодности планет для обитаемости. Наблюдения за потенциальными экзо-венерями могут помочь подтвердить гипотезы о прошлом Венеры, а также о частоте встречаемости планет, подобных ей, в других системах. Кроме того, данные будущих миссий на Венеру, таких как DAVINCI, EnVision и VERITAS, предоставят ценную информацию об этой планете, а изучение экзо-венер будет дополнять данные этих миссий. Конкретными высокоприоритетными объектами для последующих наблюдений экзо-венер, помимо планеты L 98-59 b, могут быть TOI-2285 b, LTT 1445 A c, TOI-1266 c, LHS 1140 c и др.

## 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 (соглашения № 075-15-2019-1875, № 075-15-2022-1109).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Boro Saikia, C. J. Marvin, S. V. Jeffers, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A108 (2018).
2. R. Cloutier, N. Astudillo-Defru, X. Bonfils, et al., *Astron. and Astrophys.* **629**, id. A111 (2019).
3. O. D. S. Demangeon, M. R. Zapatero Osorio, Y. Alibert, et al., *Astron. and Astrophys.* **653**, id. A41 (2021).
4. N. V. Erkaev, Y. N. Kulikov, H. Lammer, et al., *Astron. and Astrophys.* **472** (1), 329 (2007).
5. E. S. Kalinicheva, V. I. Shematovich, and I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **66** (12), 1318 (2022).
6. E. M. R. Kempton, J. L. Bean, D. R. Louie, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **130** (993), 114401 (2018).
7. T. T. Koskinen, P. Lavvas, C. Huang, et al., *Astrophys. J.* **929** (1), id. 52 (2022).
8. V. B. Kostov, J. E. Schlieder, T. Barclay, et al., *Astron. J.* **158** (1), article id. 32 (2019).
9. K. Ment, D. Charbonneau, J. Irwin, et al., arXiv e-prints astro/ph:2304.01920 (2023).
10. I. S. Savanov and V. I. Shematovich, *Astrophysical Bulletin* **76** (4), 450 (2021).
11. A. G. Sreejith, L. Fossati, A. Youngblood, et al., *Astron. and Astrophys.* **644**, id. A67 (2020).
12. L. M. Weiss, G. W. Marcy, E. A. Petigura, et al., *Astron. J.* **155** (1), article id. 48 (2018).

## Activity of M-dwarf L 98-59 and Atmospheric Escape of its Exoplanets

I. S. Savanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, 119017 Russia

A study of the activity of a bright M-dwarf L 98-59, located at a distance of 10.6 pc from Earth is reported. The star has a multiplanetary system, where one of the planets, L 98-59 b, is a rocky planet with a mass not exceeding the mass of Venus. It was found that the level of chromospheric activity of L 98-59 does not exceed the average value characteristic of other cold dwarfs with similar color index values ( $B - V$ ). This level is below solar, the mean  $\log R'_{\text{HK}}$  parameter for L 98-59 is equal to  $-5.297$  dex. The data about the parent star and its activity was used to estimate the magnitude of the atmospheric escape of five planets (including the planet candidate 05). To calculate the loss of matter from the planetary atmospheres (without a detailed modeling of the processes in the “star–planet” system), we applied an approximation formula corresponding to the energy-limited atmospheric loss model. Estimates of the XUV photon flux—extreme ultraviolet (EUV) and X-ray photons for the medium and high activity levels, as well as the estimates of the tidal parameter  $K_{\text{tide}}(\xi)$  were found. Variations of the  $\dot{M}$  parameter have been specified for five planets of the L 98-59 system, taking into account the possible activity level variations of the star. The  $\dot{M}$  parameter variations for planets c–e range from  $7.6 \times 10^6 \text{ g s}^{-1}$  to  $3.8 \times 10^7 \text{ g s}^{-1}$  (average activity level) and  $1.2\text{--}5.7 \times 10^7 \text{ g s}^{-1}$  (high activity level). For the planet L 98-59 b, the an analogue of Venus, we got the following estimates:  $1.3 \times 10^7$  and  $2.0 \times 10^7 \text{ g s}^{-1}$  (for the intermediate and high activity levels, respectively). It can be assumed that the relatively modest outflow of matter from their atmospheres  $\dot{M}$ , despite the proximity of the planets to their star, is due to a small flux of XUV photons from the star due to the low level of its activity.

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