

# АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗДЫ G1 414 A С ДВУМЯ ПЛАНЕТАМИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПОТЕРЮ МАССЫ АТМОСФЕРОЙ ПЛАНЕТЫ G1 414 A *b*

Саванов Игорь Спартакович  
ИНАСАН Москва, Пятницкая, 48  
([isavanov@inasan.ru](mailto:isavanov@inasan.ru))

Исследование выполнено в рамках проекта "Исследование звезд с экзопланетами» по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашение N 075-15-2019-1875).

# Абстракт

- Представлены результаты исследования проявлений активности карлика спектрального класса K7 Gl 414A с двумя планетами, одна из которых (планета Gl 414A *b*) при эксцентриситете  $e = 0.45$  на протяжении большей части своей орбиты находится в пределах зоны обитаемости. Наш анализ показал, что наиболее достоверным определением периода вращения Gl 414A следует признать результаты анализа фотометрических наблюдений звезды, выполненных обзором Kilodegree Extremely Little Telescope (KELT), указывающие на период ее вращения  $P = 42$  сут. Однако, по периодограммам, построенным по другим наблюдениям Gl 414A, наличие такого периода не подтверждается. Цикл долговременной активности звезды составляет величину порядка 3800 сут. (10.4 лет).
- Полученные результаты изучения активности звезды использованы для оценки потери вещества атмосферы планеты Gl 414A *b* по аппроксимационной формуле для модели потери атмосферы с ограничением по энергии. По 486 оценкам параметра  $S_{HK}$  были выполнены расчеты потери вещества атмосферой Gl 414A *b* в течение интервала в 5805 суток (15.9 лет). Величины этих потерь в основном лежат в интервале  $\log (M \text{ loss})$  от 7.15 до 7.50, а медианное значение равно 7.30. При величине эксцентриситета 0.45 расстояние от центральной звезды до Gl 414A *b* варьируется в пределах от 0.13 до 0.34 а.е., для них получены оценки потери вещества атмосферы -  $16.21 \times 10^7$  г/сек и  $2.37 \times 10^7$  г/сек, соответственно.

- *C.M. Dedrick, B.J. Fulton, H.A. Knutson, A.W. Howard, T.G. Beatty, P.A. Cargile, et al., Astronomical Journal, 161, 86. 2021* сообщили об открытии двух планет, вращающихся вокруг близкого ( $D=11.9$  пк) карлика Gl 414A спектрального класса K7. Gl 414A *b* является планетой типа суб-нептун с массой порядка  $M \sin i = 7.60 M_{\oplus}$  и большой полуосью орбиты 0.23 а.е. Вторая планета, Gl 414A *c*, является объектом типа суб-сатурн с  $M \sin i = 53.83 M_{\oplus}$  и большой полуосью 1.43 а.е.
- Для обнаружения планетной системы были использованы данные спектральных наблюдений Keck/HIRES и Automated Planet Finder at Lick Observatory, а также фотометрические данные обзора KELT. Авторы выполнили оценки периода вращения звезды и долгосрочного цикла ее магнитной активности.

- Звезда Gl 414A, известная как HD 97101A и HIP 54646A, является ярким K7V карликом, ее блеск составляет в фильтрах  $B = 9^m.67$ ,  $V = 8^m.864$ ,  $R = 8^m.691$ . Она имеет спутник HD 97101B – карлик спектрального класса M2V с блеском  $V = 9^m.98$ . Звезды образуют широкую пару с расстоянием в 408 а.е. (соответствующее угловое расстояние - 34.34 угл.сек.).

- Интерес к планетной системе Gl 414A обусловлен тем, что при значении большой полуоси орбиты 0.23 а.е. и эксцентриситете 0.45 расстояние между Gl 414A *b* и звездой варьируется от 0.13 до 0.34 а.е., и на протяжении большей части своей орбиты планета будет находиться в пределах обитаемой зоны. Правда, следует принять во внимание, что планета имеет минимальную массу  $7.6 M_{\oplus}$ , которая, вероятно, соответствует значительной оболочке, богатой летучими веществами. Возможно это обстоятельство понижает шансы на обитаемость. Равновесные температуры планет *b* и *c* составляют  $T_{eq,b} = 308.6 \pm 33.5$  К и  $T_{eq,c} = 124.7 \pm 13.5$  К, соответственно.

- Эффективная температура звезды равна  $4120 \pm 109$  K, ускорение силы тяжести  $\log g = 4.65 \pm 0.04$ , радиус  $R/R_{\odot} = 0.680 \pm 0.14$ , светимость  $L/L_{\odot} = 0.119 \pm 0.013$  и масса  $M/M_{\odot} = 0.650 \pm 0.08$ . Возраст звезды равен  $12.4 \pm 5.2$  млрд.лет. Объект Gl 414A отождествлен с источником Gaia EDR3 732857558276385664, его параллакс составляет  $\pi$  (mas) =  $84.1766 \pm 0.0258$ .
- Как указывалось, звезда обладает спутником HD 97101B – карликом спектрального класса M2V с эффективной температурой  $3663 \pm 70$ , радиусом  $R/R_{\odot} = 0.548 \pm 0.017$ , светимостью  $L/L_{\odot} = 0.048 \pm 0.005$  и массой  $M/M_{\odot} = 0.542 \pm 0.022$ . По независимой оценке его возраст равен  $11.2 \pm 5.9$  млрд.лет.
- *Dedrick et al. 2021* провели анализ фотометрических наблюдений Gl 414A, выполненных в течение 6 лет обзором Kilodegree Extremely Little Telescope (KELT). Построенный спектр мощности указал на наличие пика, соответствующего периоду вращения звезды  $P = 42$  сут. Вариации величины  $P$  от сезона наблюдений к сезону могут составлять величину порядка 4 сут.

По полученным ими спектрам Keck/HIRES *Dedrick et al. 2021* определили значения показателя звездной активности параметра  $S_{HK}$ , измеренного по линиям Ca II H и K и построили спектры мощности для величин  $S_{HK}$ . Был найден пик для периода, равного 75.4 сут, что примерно в два раза больше величины  $P$ . Комбинируя этот результат с результатом анализа данных о переменности лучевой скорости звезды, было сделано предположение о том, что величина периода вращения звезды составляет около 40 сут. Кроме того, *Dedrick et al. 2021* сделали вывод о наличии переменности величин  $S_{HK}$  с характерными временами 4554 и 2979 сут., что по мнению этих авторов соответствует цикличности в 3000 сут, найденной по данным для лучевой скорости.

- Мы провели независимый анализ данных для параметра  $S_{HK}$ . Всего было использовано 486 оценок параметра  $S_{HK}$ . На построенном спектре мощности в области, соответствующей интервалу периодов 1 – 100 сут., заметно выделяется пик, соответствующий величине периода порядка 76 сут. Кроме того, имеется набор пиков в области около 40 сут., но по нашему мнению, пики примерно такой же амплитуды имеются и для величин порядка 47 и 62 сут. Наконец, имеется указание на наличие цикличности с характерным временем в 3870 сут.

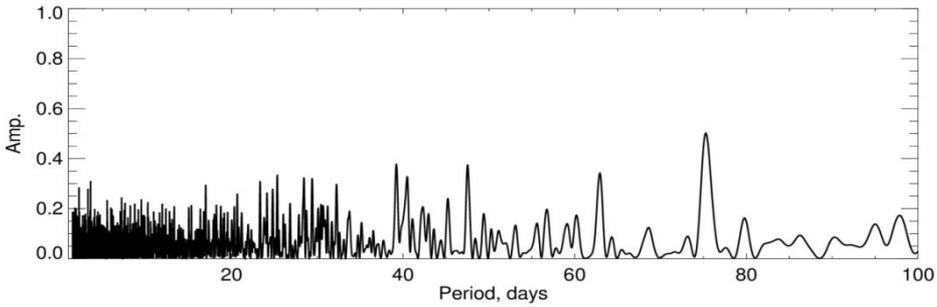
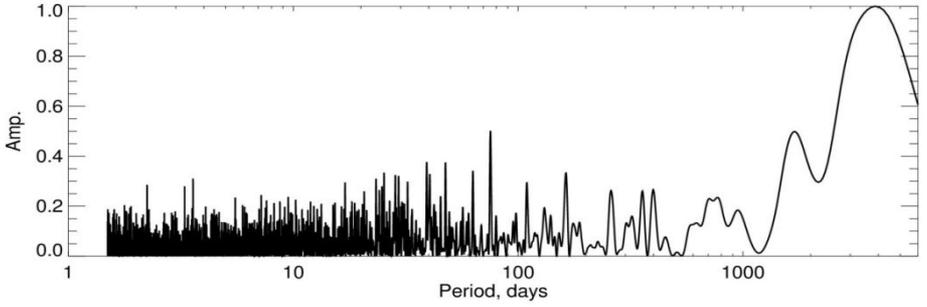
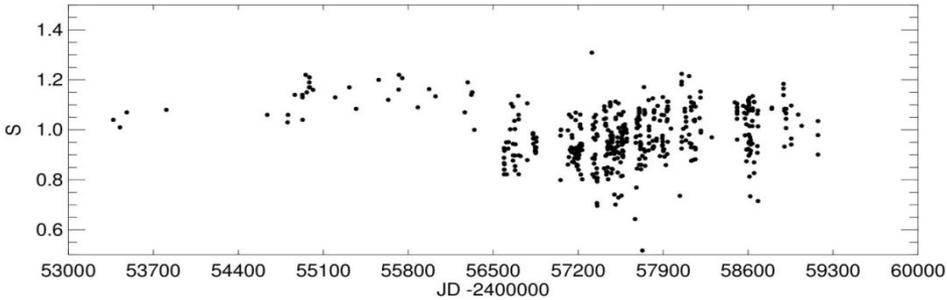
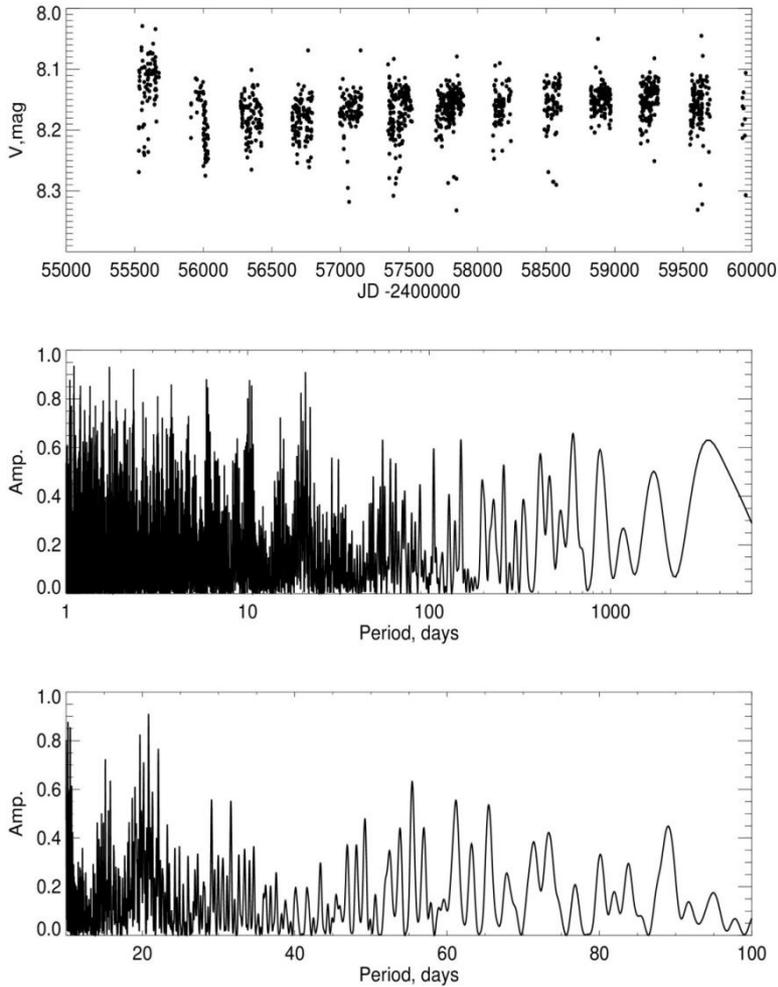


Рис.1 Вверху - данные для параметра  $S_{HK}$ ; средняя панель – спектр мощности для интервала 1 - 6000 сут.; нижняя панель - спектр мощности для интервала 10 - 100 сут. Ось абсцисс на средней панели дана в логарифмическом масштабе.

Рис.2 Вверху – блеск GJ 414A в фильтре V по данным обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS); средняя панель – спектр мощности для интервала 1 - 6000 сут.; нижняя панель - спектр мощности для интервала 10 - 100 сут. Ось абсцисс на средней панели дана в логарифмическом масштабе.



- По данным многолетнего обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS) [<http://kws.cetus-net.org>] нами была выполнена еще одна попытка проведения анализа проявлений активности GJ 414A. В обзоре представлены наблюдения звезды в фильтрах V и Ic, но мы ограничились только анализом данных для фильтра V, обладающих более длительным интервалом наблюдений в 4424 сут. (12.1 лет) (HJD 2455530.332 - 2459955.290).
- Всего было рассмотрено 1342 оценок блеска звезды в фильтре V. На основе построенного спектра мощности для блеска GJ 414A можно предположить существование возможных циклов активности более 3000 сут. и переменности на шкале времени порядка 10 - 100 сут. (вероятный период вращения звезды) (рис. 2, нижняя диаграмма). Представляется возможным сопоставление результатов анализа переменности блеска звезды и измеренного индекса  $S_{HK}$ , характеризующего хромосферную активность звезды (рис. 1 и 2). Циклы долговременной активности в обоих случаях составляют величину порядка 3800 сут. (10,4 лет). В области 10-100 сут. ситуация совершенно различная – на рис.2 отсутствуют пики в области 40 сут., но их можно видеть в областях около 47, 62 и 76 сут., а также имеется набор пиков в области 20 сут. Отметим, что ни в одном из рассматриваемых нами случаев нет такого ярко-выраженного пика, характеризующего период вращения звезды (42.48 сут.).

- **Потеря вещества атмосферы Gl 414A b.** Gl 414A b является планетой типа суб-нептун с массой порядка  $M \sin i = 7.60 M_{\oplus}$  и большой полуось орбиты 0.23 а.е. Экзопланета типа суб-нептуна с течением времени теряет свою гелиево-водородную атмосферу. Для подсчёта такой потери без детального моделирования системы в нашем исследовании использовалась аппроксимационная формула (обычно называемая в литературе, как модель потери атмосферы с ограничением по энергии). В этой модели предполагается, что поток жесткого УФ-излучения поглощается в тонком слое радиуса  $R_{XUV}$ , где оптическая толщина для звездных XUV-фотонов равна единице, и включен учёт приливного эффекта:

$$\frac{dM_p}{dt} \approx \frac{\epsilon_{XUV} \cdot \pi \cdot F_{XUV} \cdot R_p \cdot R_{XUV}^2}{G \cdot M_p \cdot K_{tide}(\xi)}$$

- где  $\epsilon$  – параметр эффективности нагрева (для мини-нептунов и супер-земель);  $G$  – гравитационная постоянная;  $F_{XUV}$  – поток XUV-фотонов;  $R_p$  – радиус планеты;  $M_p$  – масса планеты;  $R_{XUV}$  – радиус поглощения XUV-фотонов;  $K_{tide}$  – приливный параметр.

- Основные данные о планете Gl 414A *b* были взяты из *Dedrick et al. 2021*. Для вычислений по формуле (1) требуются оценки величины – (потока XUV-фотонов). Для этой цели нами были использованы аналитические зависимости, полученные *A.G. Sreejith, L. Fossati, A. Youngblood, K. France and S. Ambily, Astronomy and Astrophysics, 644, A67, 2020* и связывающие величину потока и параметр  $\log R'_{\text{HK}}$  для звезд спектральных классов от F до M.
- Gl 414A является достаточно активной K-звездой. Медианное значение параметра  $S_{\text{HK}}$  (показателя звездной активности, измеренного по линиям Ca II H и K в полученных спектрах Keck/HIRES) составляет 0.98, а соответствующая ему величина  $\log R'_{\text{HK}}$  равна -4,72. Эти значения в целом согласуются с данными *S. Boro Saikia, C.J. Marvin, S.V. Jeffers, et al., Astronomy and Astrophysics, 616, A108, 2018*, но возможно соответствуют несколько более низкому уровню активности, согласно которым  $S_{\text{HK}}=1,14$  и  $\log R'_{\text{HK}} = -4,50$ . Расхождение между  $\log R'_{\text{HK}}$  возможно обусловлены различиями в методологии и калибровках, используемых для преобразования между  $S_{\text{HK}}$  и  $\log R'_{\text{HK}}$ . Следует иметь в виду также циклическую переменность хромосферной активности звезды (см. выше), также, возможно, приводящую к разбросу в оценках величин  $\log R'_{\text{HK}}$ .
- Расчеты по соотношению (1) показали, что потеря вещества атмосферы меняется от значения  $2.0 \times 10^7$  г/сек для величины  $\log R'_{\text{HK}} = -4,72$  до  $5.23 \times 10^7$  г/сек для  $\log R'_{\text{HK}} = -4.50$ , т.е. примерно в 2.6 раз. Вероятно хромосферная активность звезды обладает циклическими изменениями на шкале времени порядка 3000 сут. Располагая 486 оценками параметра  $S_{\text{HK}}$ , мы выполнили расчеты потери вещества атмосферой Gl 414A *b* в течение интервала в 5805 суток (15.9 лет). Для перевода величин  $S_{\text{HK}}$  в  $\log R'_{\text{HK}}$  нами была использована калибровка из *D. Lorenzo-Oliveira, F.C. Freitas, J. Melendez, M. Bedell, I. Ramirez, J.L. Bean et al., Astronomy and Astrophysics, 619, A73, 2018*. Параметры звезды (Т эфф и показатель цвета (B-V) ) были взяты из *Dedrick et al. 2021*.

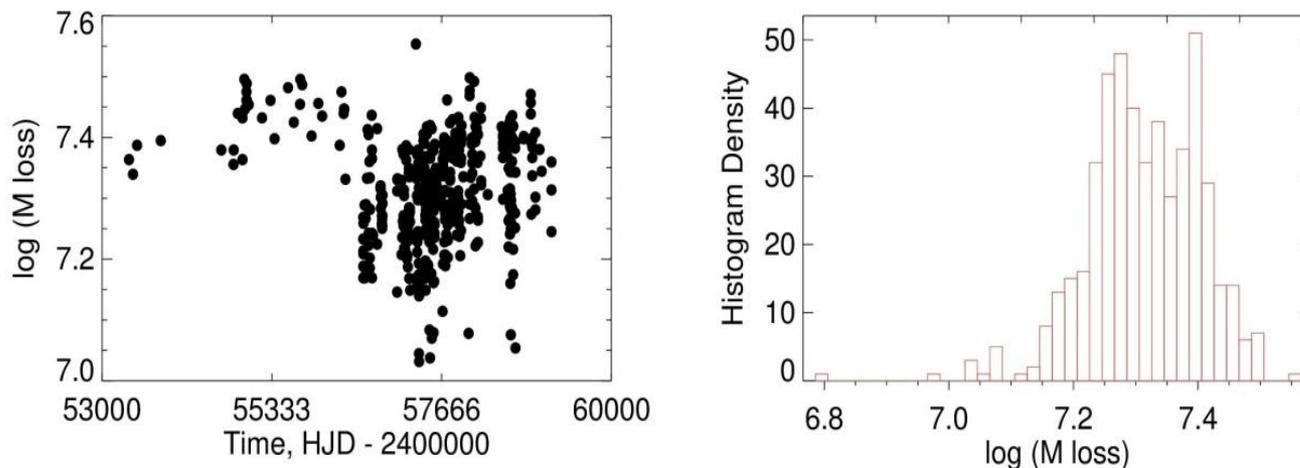


Рис.4 - Слева - потеря вещества атмосферы планеты *b* со временем; справа – гистограмма для оценок потери вещества атмосферы планеты *b*.

На рис. 4 (слева) представлен график изменений величин потери вещества атмосферы планеты *b* со временем. Поскольку в наших расчетах варьировались оценки величины – (потока XUV-фотонов), то вполне естественно, что по характеру циклического изменения величины потери вещества повторяют зависимость индекса хромосферной активности. Справа на рисунке представлена гистограмма для оценок потери вещества атмосферы. Величины потери вещества атмосферы планеты *b* в основном лежат в интервале  $\log (M \text{ loss})$  от 7.15 до 7.50, медианное значение равно 7.30. Сравнительно низкая величина потери вещества атмосферы планеты *b*, прежде всего, вероятно связана со значительным ее удалением от звезды (большая полуось орбиты составляет 0.23 а.е.). Кроме того, подчеркнем, что мы посчитали достаточным использование аппроксимационной формулы, соответствующей модели потери атмосферы с ограничением по энергии, поскольку нас интересовал ответ на вопрос об изменениях в потере вещества в случае вариации уровня долговременной активности звезды.

Для планеты *c*, значительно удаленной от звезды (большая полуось орбиты равна 1.43 а.е. ) величина потери вещества атмосферы еще более низкая – порядка  $5.23 \times 10^6$  г/сек.

- Согласно *Dedrick et al. 2021* зона обитаемости вокруг Gl 414A лежит в интервале от 0.37 а.е. до 0.70 а.е, однако более оптимистичная оценка величины внутренней границы - 0.21 а.е. Планета *a* лежит вне зоны обитаемости. Планета *b* частично заходит в зону обитаемости. При величине большой полуоси 0.23 а.е. и эксцентриситете 0.45, расстояние от центральной звезды до Gl 414A *b* варьируется от 0.13 до 0.34 а.е., и на протяжении большей части своей орбиты она находится в пределах этой обитаемой зоны. Как выше указывалось, потеря вещества атмосферы планеты *b* составляет  $5.23 \times 10^7$  г/сек при величине  $\log R'_{\text{HK}} = -4.50$  и для расстояния планеты от звезды, соответствующего величине большой полуоси 0.23 а.е. Для расстояний 0.13 а.е. и 0.34 а.е. потеря вещества атмосферы равна  $16.21 \times 10^7$  г/сек и  $2.37 \times 10^7$  г/сек, соответственно. Таблица содержит результаты численных оценок, полученных при варьировании параметров – активности звезды, расстоянии до планеты.

Таблица 1

ОЦЕНКИ ПОТЕРИ ВЕЩЕСТВА АТМОСФЕРЫ Gl 414A b

Параметр	Потеря вещества атмосферы планеты, г/с
$\log R'_{\text{HK}} = -4.72, a = 0.23 \text{ а.е.}$	$2.0 \cdot 10^7$
$\log R'_{\text{HK}} = -4.50, a = 0.23 \text{ а.е.}$	$5.23 \cdot 10^7$
$\log R'_{\text{HK}} = -4.50, a = 0.13 \text{ а.е.}$	$16.21 \cdot 10^7$
$\log R'_{\text{HK}} = -4.50, a = 0.34 \text{ а.е.}$	$2.37 \cdot 10^7$

- *Заключение.*

- В первой части статьи представлены результаты анализа проявлений активности карлика спектрального класса K7 Gl 414A с двумя планетами. Звезда обладает спутником HD 97101B – карликом спектрального класса M2V. Отличительной особенностью планеты Gl 414A *b* является то, что при эксцентриситете  $e = 0.45$  на протяжении большей части своей орбиты планета находится в пределах зоны обитаемости. Наш анализ показал, что наиболее достоверным результатом определения периода вращения Gl 414A следует признать результаты анализа фотометрических наблюдений звезды, выполненных обзором Kilodegree Extremely Little Telescope (KELT), указывающие на период вращения звезды  $P = 42$  сут. При этом, на периодограммах, построенных по другим наблюдениям Gl 414A, мы не видим пиков, соответствующих этому периоду. Цикл долговременной активности звезды составляет величину порядка 3800 сут. (10.4 лет).

- Полученные результаты изучения активности звезды использованы для оценки потери вещества атмосферы планеты Gl 414A *b*. В данном исследовании была применена аппроксимационная формула, соответствующая модели потери атмосферы с ограничением по энергии. Для вычислений по указанной формуле оценки величины  $F_{XUV}$  – (поток XUV-фотонов) были установлены по аналитической зависимости, связывающей  $F_{XUV}$  и параметр  $\log R'_{HK}$  для звезд спектральных классов F - M. Расчеты показали, что потеря вещества атмосферы меняется от значения  $2.0 \times 10^7$  г/сек до  $5.2 \times 10^7$  г/сек в зависимости от принимаемой величины  $\log R'_{HK}$ . По 486 оценками параметра  $S_{HK}$  были выполнены расчеты потери вещества атмосферой Gl 414A *b* в течение интервала в 5805 суток (15.9 лет). Величины потери вещества атмосферы планеты *b* в основном лежат в интервале  $\log (M \text{ loss})$  от 7.15 до 7.50, а медианное значение составляет 7.30. При величине эксцентриситета 0.45 расстояние от центральной звезды до Gl 414A *b* варьируется от 0.13 до 0.34 а.е. и на протяжении большей части своей орбиты она находится в пределах обитаемой зоны. Для этих расстояний получены оценки потери вещества атмосферы:  $16.21 \times 10^7$  г/сек и  $2.37 \times 10^7$  г/сек, соответственно.