

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 4, Number 314 (2017), 117 – 122

UDC 524.38

L.I. Shestakova, И.В.Рева, А.В.Кусакин

Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan
shest1952@mail.ru, alfekka@list.ru, un7gbd@gmail.com**TRANSIT PASSAGES OF PLANETOIDS NEAR WHITE
DWARF WD1145 + 017 AND THEIR THERMAL EVOLUTION**

Abstract. The results of the analysis of the evaporation of planetoids, their fragments and dust particles, found in close orbits near the white dwarf WD1145 + 017, are presented. The data of observations made in 2016, performed on the program WET (World Earth Telescope) at the Tien-Shan Astronomical Observatory (TShAO, Almaty, Kazakhstan) were used. As a result of calculations it was found out that particles whose radii are less than 1 μm evaporate within 30 years.

The emerging separation of a group of fragments in 2016, in 2017 became clear. The group of planetoids had divided, the distance between groups on the assumption of a circular orbit was about 1.1 million km. The main period of 4.5 hours preserved. The dynamic activity of the white dwarf WD1145 + 017 system will require special analysis.

Key words: white dwarf, debris disk, dust particles, planetoids, sublimation

УДК 524.38

Л.И. Шестакова, И.В. Рева, А.В. Кусакин

Астрофизический институт им. В.Г.Фесенкова, Алматы, Казахстан

**ТРАНЗИТНЫЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ПЛАНЕТОИДОВ ОКОЛО БЕЛОГО
КАРЛИКА WD1145+017 И ИХ ТЕРМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ**

Аннотация. Представлены результаты анализа процесса испарения планетоидов, их фрагментов и пылевых частиц, обнаруженных на близких орбитах около белого карлика WD1145+017. Используются данные наблюдений 2016 года, выполненные по программе WET (Всемирный Наземный телескоп) на Тянь-Шаньской астрономической обсерватории (ТШАО, Алматы, Казахстан). В результате расчетов выяснено, что частицы, радиусы которых меньше 1 μm , испаряются в пределах 30 лет.

Наметившееся разделение группы фрагментов в 2016 году в 2017 году стало отчетливым. Группа планетоидов разделилась, расстояние между группами в предположении круговой орбиты стало около 1.1 млн км. При этом основной период 4.5 часа сохранился. Динамическая активность системы белого карлика WD1145+017 потребует специального анализа.

Ключевые слова: белый карлик, осколочный диск, пылевые частицы, планетоиды, сублимация.

Введение. В течение последних лет на Тянь-Шаньской астрономической обсерватории (ТШАО) ведется регулярный поиск и исследование новых переменных звезд на телескопе Zeiss-1000 [1]. В 2016 году на ТШАО по программе WET (Всемирный Наземный телескоп) наблюдался белый карлик WD1145+017 ($\alpha = 11^{\text{h}} 48^{\text{m}} 34^{\text{s}}$, $\delta = +01^{\circ} 28' 59''$, $V = 17.24^{\text{m}}$), расположенный на расстоянии 174 парсек от Солнца. Наблюдения проводились с телескопом Zeiss-1000 (Восточный), диаметр зеркала 1000 мм, фокусное расстояние системы 6650 мм. Использовалась CCD камера Argee U9000 D9 с колесом фильтров, которые образуют фотометрическую систему близкую к стандартной системе Джонсона BVR. Обработка полученных изображений и фотометрия объектов проводились с использованием программы MaxIm DL5.

Известно, что около этой звезды вращается планета с периодом 0.19 земных дней (± 0.04), которая была открыта транзитным методом в 2015 году [2]. Белые карлики являются конечным состоянием большинства звезд, в том числе Солнца, после того, как они исчерпали свое ядерное топливо. Примерно 24% - 50% белых карликов имеют элементы тяжелее гелия в их атмосферах, даже если эти элементы быстро оседают в недрах

звезд или иногда пополняются извне. Соотношение обилия тяжелых элементов в атмосферах белых карликов подобны скалистым телам в Солнечной системе. Это обстоятельство, а также существование теплового осколочного диска вокруг около 4% белых карликов позволяют предположить, что скалистые обломки планетных систем иногда загрязняют атмосферы белых карликов. Общая масса аккреции может быть сравнима с массой крупных астероидов в Солнечной системе. Тем не менее, процесс срыва планетарного материала еще не наблюдался.

WD 1145 + 017 (также обозначается EPIC 201563164) является белым карликом с гелиевой оболочкой, согласно наблюдениям космического телескопа Кеплер во время миссии НАСА, которую называют K2. После обработки данных K2 для WD 1145 + 017 получен транзитный сигнал с периодом 4,5 часа. С помощью анализа Фурье данных K2, в работе [2] определили пять более слабых дополнительных периодов, но статистически значимых, все с периоды от 4,5 до 5 часов. Обнаружено, что глубина и форма транзитов значительно различались в течение 80 дней наблюдений.

Сильные транзитные прохождения, которые происходят каждые 4,5 часа, демонстрируют различную глубину до 40% и асимметричные профили, что свидетельствует о небольшом объекте с кометным хвостом из пыльного материала. При этом спектр звезды показывает заметные линии от тяжелых элементов, таких как магний, алюминий, кремний, кальций, железо и никель. Данные этой системы подтверждает предположение о том, что тяжелые элементы, загрязняющие поверхность белых карликов, могут происходить из разрушенных скальных тел, таких как астероиды и малые планеты.

В работе [3] получены обширные фотометрические наблюдения белого карлика WD 1145 + 017, который обладает одним и, возможно, несколькими крупными астероидами с выбросами пыли. По данным [3] наблюдения в течение 37 ночей, с ноября 2015 по январь 2016 г. с небольшими телескопами обнаружили 237 значительных провалов в кривой блеска. Периодограммы выявили значительную периодичность 4.5004 часов. В течение часа на кривой блеска наблюдается депрессия в потоке со средней глубиной почти 10 процентов. Эта депрессия, в свою очередь, состоит из ряда более коротких, а иногда и более глубоких провалов. Найдены также многочисленные провалы на других орбитальных фазах, дрейфующие относительно основного периода. Их наличие объясняется присутствием фрагментов астероидов, движущихся по меньшим орбитам. Определена масса основного астероида $\approx 10^{23}$ г, или около 1/10 масса Цереры. В работе [3] даны дополнительные параметры звезды: $M_{wd} = 0.6 \pm 0.05 M_{\odot}$, $R_{wd} = 1.34 \pm 0.14 R_{Earth}$, $T_{eff} = 15900 \pm 500$ K, $L_{bol} = 0.0088 \pm 0.0021$. Кроме того, дан основной период астероида: $P_A^b = 4.4989 \pm 0.0001$ часов и большая полуось орбиты: $a_A^c = 0.0054$ AU = $94 R_{wd} = 1.16 R_{\odot}$. Радиус астероида примерно равен 200 km или 12% радиуса Луны.

Наблюдения 2016-2017гг. Проведение фотометрических наблюдений избранных пульсирующих белых карликов по согласованной международной программе WET (Всемирный наземный телескоп) проводилось на ряде обсерваторий, включая ТШАО. Координационный центр (DARC) данной программы находится в университете штата Делавер (США), координатор - доктор Джудит Провенкаль. Выбор объектов, сроки, а также методику наблюдений и их обработки утверждает научный совет WET. В программу WET входит более 30 обсерваторий, расположенных по всему миру. Из обсерваторий бывшего СССР в ней участвуют Молетай (Литва, телескоп диаметром 1.65 м), Терскол (Россия, 2м), Майдакан (Узбекистан, 1.5м) и ТШАО (телескоп 1.0м, Казахстан).

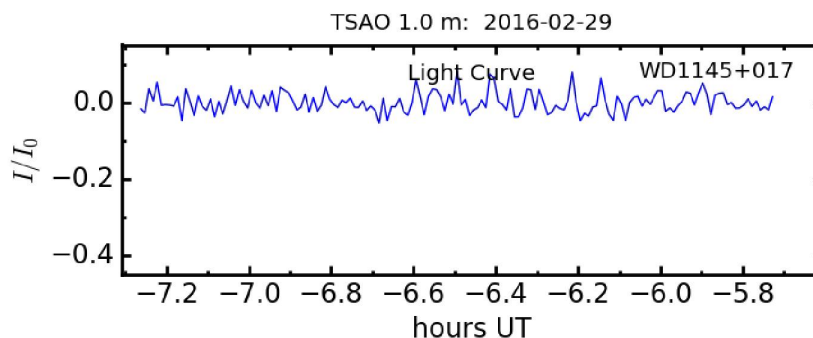


Рисунок 1 - Кривая блеска белого карлика WD1145+017, получена 29.02. 2016

Наши наблюдения белого карлика WD1145+017 выполнены на ТШАО в период с 29 февраля по 14 апреля. Всего по программе WET получен 31 сеанс наблюдений и данные для 8227 точек (моментов времени). Наши наблюдения охватывают более 40% сеансов наблюдений (13 из 31), что объясняется аномально большим количеством ясных ночей на Тянь-Шане в марте 2016 года.

Кривая блеска, полученная 29 февраля, охватывающая интервал времени 1,8 часа (рисунок 1), не показала никаких признаков транзитных прохождений.

После нескольких ночей наблюдений на кривых блеска, охватывающих временной период около 5 часов, появился отчетливый минимум, который повторился по наблюдениям нескольких ночей. И только после ночей наблюдений, охватывающих период 6-7 часов, уверенно зарегистрированы два повторившихся минимума (рисунки 2 и 3), которые показали транзитные прохождения группы планетоидов по диску звезды с периодом около 4,5 часа.

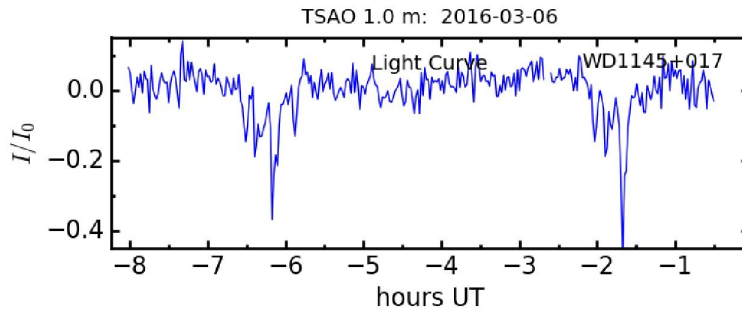


Рисунок 2 - Кривая блеска белого карлика, полученная 6 марта 2016 (ТШАО)

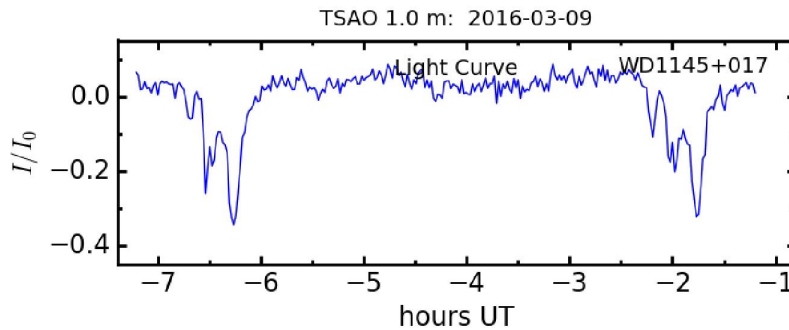


Рисунок 3 - Кривая блеска белого карлика WD1145+017, получена 9.03. 2016

Кривые блеска, полученные в разные даты, имеют небольшие отличия, обусловленные шумовой компонентой и пульсациями самой звезды, но период для основного минимума блеска сохраняется неизменным.

Новая серия наблюдений белого карлика WD1145+017, полученная в 2017 году также подтвердила существование орбитальных транзитных прохождений группы планетоидов и их фрагментов по диску звезды (рисунок 4).

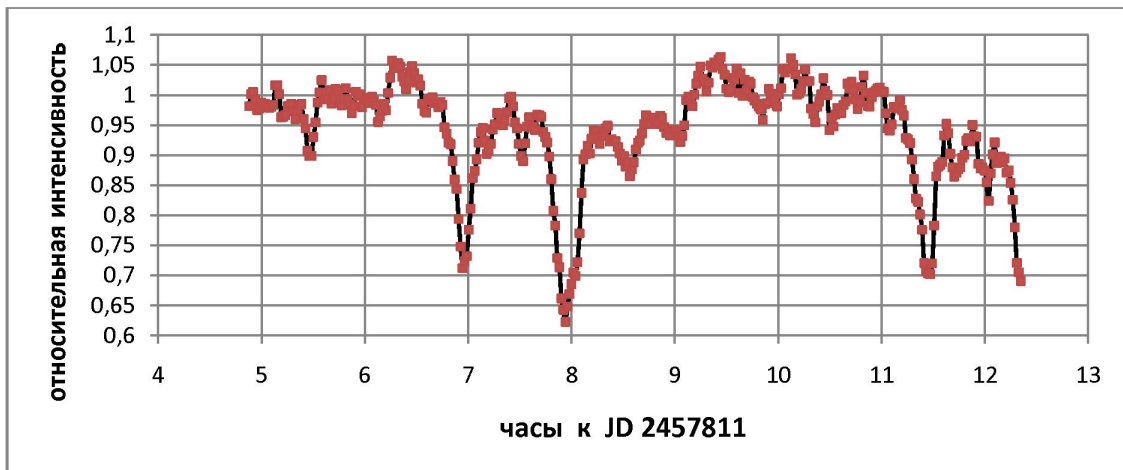


Рисунок 4 - Кривая блеска белого карлика WD1145+017, получена 26.03. 2017

Наметившееся разделение группы фрагментов в 2016 году, как видно из рисунков 2 и 3, в 2017 году стало отчетливым. Группа планетоидов разделилась, расстояние между группами в предположении круговой орбиты стало около 1.1 млн км. При этом основной период 4.5 часа сохранился.

Термическая эволюция и оценка времени жизни фрагментов планетоидов. На основании данных работы [3], где получены основные параметры белого карлика WD1145+017, можно вычислить температуру предполагаемого астероида или его фрагментов, а также скорость испарения и время жизни фрагментов разного размера. Используем следующие данные из [3]: $a = 0.0054 \text{ AU} = 94 R_{\text{wd}} = 1.16 R_{\odot}$ - большая полуось орбиты и $T_{\text{eff}} = 15900 \pm 500 \text{ K}$ - эффективная температура звезды.

По результатам наблюдений поведения пыли в Солнечной системе [4] получено, что материалом, наиболее удовлетворяющим наблюдениям, является базальт. Частицы базальта образуют границу зоны испарения на расстоянии около 7 солнечных радиусов, что удовлетворяет наблюдениям [4]. Исходя из этих наблюдательных данных, выберем для оценок времени жизни планетоидов около белого карлика свойства испарения базальтового материала.

Частицы базальта [5], начиная с радиусов пылинок $r \geq 10 \text{ мкм}$, имеют температуру близкую к температуре черного тела, поэтому расчеты будем проводить в чернотельном приближении. При равномерном прогреве частиц пыли, камней и фрагментов астероидов на расстоянии $R = 94 R_{\text{wd}}$ от звезды получим температуру частиц:

$$T = T_{\text{eff}}(R_{\text{wd}}/2R)^{1/2} = 15900/(2 \cdot 94)^{1/2} = 1160 \text{ K},$$

где $R = a$ - расстояние от звезды.

При медленном вращении, когда крупные фрагменты не успевают полностью прогреться, температура подсолнечной точки будет в $(2)^{1/2}$ раза больше:

$$T = T_{\text{eff}}(R_{\text{wd}}/R)^{1/2} = 15900/(94)^{1/2} = 1640 \text{ K}.$$

Скорость уменьшения радиуса частицы согласно [6] в см/сек:

$$\dot{r} = \frac{0.0408}{\delta} \cdot P \cdot \sqrt{\frac{M_g}{T}} \quad (1)$$

Для вычисления давления насыщенных паров P служит формула [6]: $\lg(P) = 10.915 - 24928.3/T$, где P выражено в торах ($1 \text{ тор} = 1 \text{ мм.рт.ст.}$). Плотность вещества $\delta = 2.5 \text{ г/см}^3$, $M_g = 67$ - молекулярный вес материала базальта и T - температура частицы.

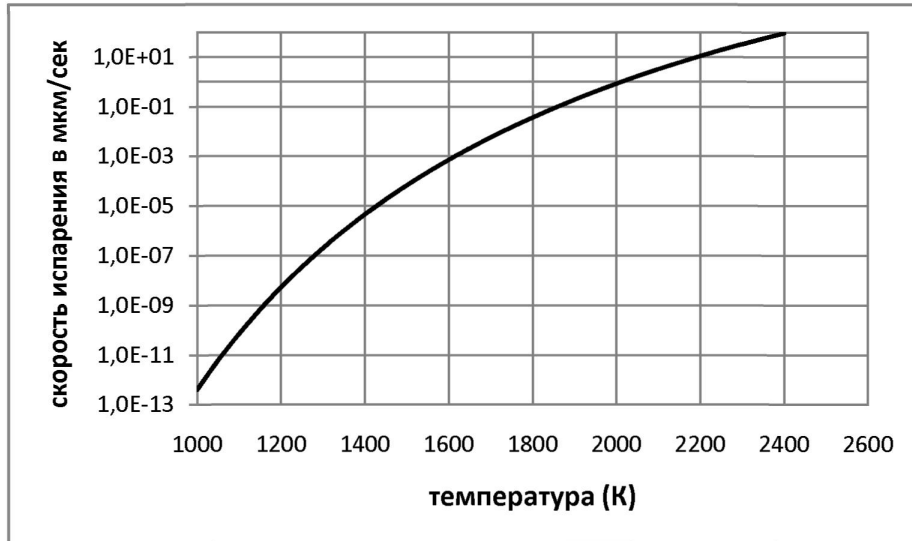


Рисунок 5 - Скорость уменьшения радиуса базальтовых частиц в процессе испарения в зависимости от температуры

Согласно данным [3], радиус планетоида, вращающегося около белого карлика WD1145+017, оценивается величиной 200 км. Поскольку по наблюдениям видно, что кривой блеска меняется при каждом новом прохождении не только из-за шумовой составляющей, а еще из-за фрагментации группы планетоидов, будем

считать эту величину максимальной оценкой для размеров планетоидов. Естественно, что около карлика вращается группа фрагментов всевозможных радиусов, меньших 200 км, а также частицы пыли.

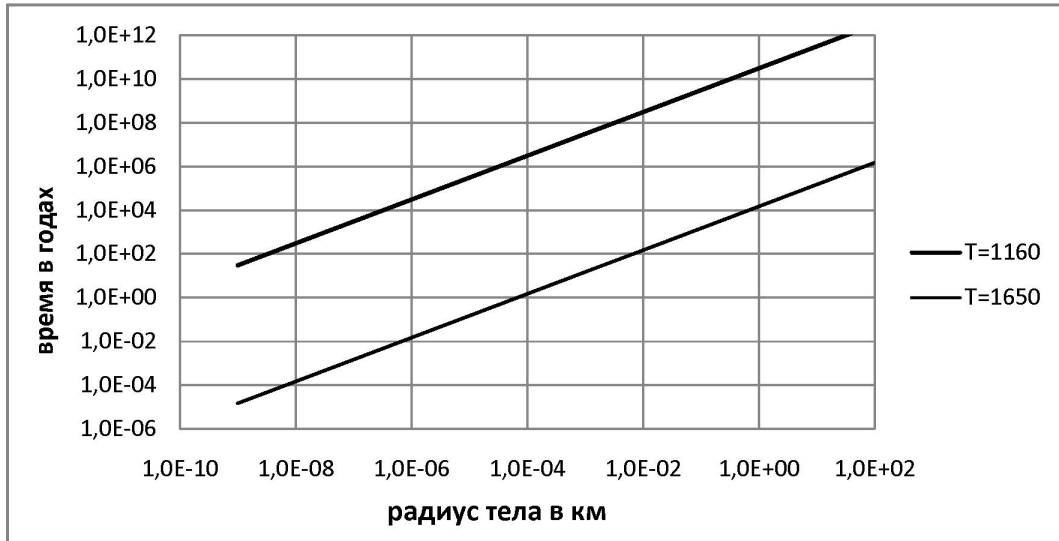


Рисунок 6 - Время жизни базальтовых фрагментов при равновесной температуре (T=1160K) и при максимально возможной температуре (T=1650K)

На рисунке 5 представлены расчеты скорости испарения, то есть уменьшения радиусов частиц при равномерном прогреве в условиях термодинамического равновесия согласно [6]. На рисунке 6 промежуток между линиями ограничивает реальное время испарения фрагментов планетоидов. При сильном нагреве части поверхности в подсолнечной точке и при отсутствии полного прогрева тела, что реализуется для тел километровых размеров, скорость испарения будет ближе к рассчитанной для T=1650K, но примерно в 4 раза меньше, поскольку прогревается только диск площадью πr^2 вместо полной поверхности тела, равной $4\pi r^2$. С учетом этой поправки время жизни тела радиусом около 200 км будет близок к 10^7 лет.

Таблица иллюстрирует время жизни мелких фрагментов, более реальные величины соответствуют двум последним столбцам, где T=1160K, поскольку мелкие фрагменты прогреваются однородно и их температуры соответствуют чернотельным.

Таблица - Времена жизни малых частиц и пыли

радиус в км	радиус	время жизни в годах (T=1650K)	время жизни в сутках (T=1650K)	время жизни в годах (T=1160K)	время жизни в сутках (T=1160K)
1,0E-04	10 см	1,502	548,6055	3,05E+06	1,11E+09
1,0E-05	1см	0,1502	54,86055	3,05E+05	1,11E+08
1,0E-06	1мм	0,01502	5,486055	3,05E+04	1,11E+07
1,0E-07	100мкм	0,001502	0,548606	3,05E+03	1,11E+06
1,0E-08	10мкм	0,00015	0,054861	3,05E+02	1,11E+05
1,0E-09	1мкм	1,5E-05	0,005486	30,47	1,11E+04

Из рисунка 6 и таблицы видно, что процессы испарения для изотермических условий при T = 1160K незначительны. Процесс испарения более активно происходит в «подсолнечной» точке при T = 1650K. Различие в скорости испарения достигает 9 порядков, поэтому процесс неравновесен и отличается нестабильностью и наличием тепловых напряжений.

Термическая эволюция планетоидов не ограничивается только испарением. Фрагменты могут дробиться за счет термических напряжений. Этот фактор становится особенно значительным при температурах, превышающих 1000K. При таких температурах пределы прочности материалов уменьшаются в 10 – 100 раз. Дальнейшие расчеты времени жизни планетоидов должны учитывать эти факторы. Дробление материала с

дневной стороны планетовидов может привести к значительному сокращению времени жизни крупных фрагментов метрового и километрового размеров.

РАБОТА ВЫПОЛНЕНА ПО ПРОЕКТУ 0073-3/ПЦФ-15 КОМИТЕТА НАУКИ МОН РК.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кусакин А. В., Хруслов А. В., Кокумбаева Р. И. Поиск и исследование новых переменных на телескопе ZEISS-1000 Тянь-Шаньской астрономической обсерватории, Известия НАН РК, серия физико-математическая, № 4, 2014, С. 51-59.
- [2] Vanderburg A., Johnson J.A., Rappaport S, Bieryla A., Irwin J., et al. A Disintegrating Minor Planet Transiting a White Dwarf, *Nature*, V. 52, 2015, P.546–549.
- [3] Rappaport S., Gary B. L., Kaye T., Vanderburg A.; Croll B., Benni P., Foote J. Drifting asteroid fragments around WD 1145+017, *MNRAS*, V.458, N.4, 2016, P.3904 – 3917.
- [4] Shestakova L.I. and Demchenko B.I. Results of Observations of the dust distribution in the F-corona of the Sun, *Solar System Research*, V.50, №2, 2016, P.143 – 160.
- [5] Шестакова Л.И., Демченко Б.И. Орбитальная эволюция пылевых частиц в области сублимации около звезды солнечного типа, Известия НАН РК. Серия физико-математическая, № 5, 2013, С.77-87.
- [6] Lamy P.L. Interaction of interplanetary dust grains with the solar radiation field, *Astron. Astrophys.*, V.35, 1974b, P.197-207.

REFERENCES

- [1] Кусакин А. В., Хруслов А. В., Кокумбаева Р. И. *Известия НАН РК, серия физико-математическая*, **2014**, № 4, С. 51-59.
- [2] Vanderburg A., Johnson J.A., Rappaport S, Bieryla A., Irwin J., et al. *Nature*, **2015**, V. 52, P.546–549.
- [3] Rappaport S., Gary B. L., Kaye T., Vanderburg A., Croll B., Benni P., Foote J. *MNRAS*, **2016**, V.458, N.4, P.3904 – 3917.
- [4] Shestakova L.I. and Demchenko B.I. *Solar System Research*, **2016**, V.50, №2, P.143 – 160.
- [5] Шестакова Л.И., Демченко Б.И. *Известия НАН РК. Серия физико-математическая*, **2013**, № 5, С.77-87.
- [6] Lamy P.L. *Astron. Astrophys.*, **1974b**, V.35, P.197-207.

ӘОЖ: 524.38

Л.И. Шестакова, И.В. Рева, А.В. Кусакин

В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты, Алматы қ., Қазақстан

WD1145+017 АҚ ЕРГЕЖЕЙ МАҢЫНДАҒЫ ПЛАНЕТОИДТАРДЫҢ ТРАНЗИТТІК ӨТУІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ТЕРМИЯЛЫҚ ЭВОЛЮЦИЯСЫ

Аннотация. WD1145+017 ақ ергежей маңында орбитаға жақын табылған планетоидтар булануы, олардың фрагменттері және шаң-тозанды бөлшектерінің процестерінің талдау нәтижелері көрсетілген. Тянь-Шань астрономиялық обсерваториясында (Қазақстан, Алматы, ТШАО), WET (Бүкіләлемдік жер телескобы) бағдарламасы бойынша алынған 2016 жылғы бақылау мәліметтері қолданылған. Есептеулердің нәтижесінде, 30 жылда радиусы 1 мкм кіші бөлшектер буланатындығы анықталды.

Фрагменттердің группаға бөлінуі 2016, 2017 жылдары айқын байқалады. Планетоидтар тобы, топтардың аралығында арақашықтық, шеңберлі орбиталар болжамы 1.1 млн. км жақын болып шықты. Бұл ретте негізгі период 4.5 сағат сақталды. WD1145+017 ақ ергежейдің динамикалық белсенділік жүйесіне арнайы талдаулар жүргізу қажет.

Түйін сөздер: ақ ергежей, дисктің сынығы, шаң-тозанды бөлшектер, планетоидтар, сублимация.

Сведения об авторах:

Шестакова Любовь Илларионовна - канд.ф.-м. наук, астрофизик, адрес: 050020, Алматы, Обсерватория, д.23. Место работы: ДТОО «Астрофизический институт им. В.Г.Фесенкова», зав. лаб. физики звезд и туманностей, т. +7 777 16 33 154, р.т. 260 74 41, факс. 260 75 90, shest1952@mail.ru.

Рева Инна Владимировна - образование высшее, Место работы: ДТОО «Астрофизический институт им. В.Г.Фесенкова», МНС лаб. физики звезд и туманностей, т. +7 707 531 38 55, р.т. 260 75 90, факс. 260 75 90, alfekka@list.ru.

Кусакин Анатолий Васильевич - канд.ф.-м. наук, астрофизик, Место работы: ДТОО «Астрофизический институт им. В.Г.Фесенкова», ВНС лаб. физики звезд и туманностей, т. +7 702 835 12 24, р.т. 260 75 90, факс. 260 75 90, un7gbd@gmail.com