В ЖУРНАЛЕ «НАУЧНЫЕ ТРУДЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН» ПУБЛИКУЮТСЯ СТАТЫИ ПО РАЗЛИЧНЫМ АСПЕКТАМ АСТРОНОМИИ, В ТОМ ЧИСЛЕ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ АСТРОФИЗИКЕ, ПЛАНЕТНОЙ АСТРОНОМИИ, ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ, ФИЗИКЕ СОЛНЦА, НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКЕ АСТРОНОМИЧЕСКИМ МЕТОДАМ И ПРИБОРАМ, КОСМИЧЕСКИМ ИССЛЕ-ДОВАНИЯМ И ИССЛЕДОВАНИЯМ В ОБЛАСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ:



# ISSN 2658-5669 НАУЧНЫЕ ТРУДЫ института РАН ВСІЕНСЕ REPORTS









москва 2020

УЛК 52 ББК 22.6 H34

## НЗ4 Научные труды Института астрономии РАН. Том 5(3). -

М.: Изд-во Янус-К, 2020, 84 с., илл.

ISSN 2658-5669

Редколлегия

Сачков М.Е. (главный редактор), Вибе Д.З. (зам. главного редактора), Бисикало Д.В., Барабанов С.И., Кузнецов Э.Д., Малков О.Ю., Машонкина Л.И., Фатеева А.М., Шематович В.И., Шустов Б.М.

Секретарь редколлегии Вибе Е.Д.

«Научные труды Института астрономии РАН» – рецензируемый журнал, публикующий статьи по различным аспектам астрономии, в том числе по теоретической и наблюдательной астрофизике, планетной астрономии, звездной астрономии, физике Солнца, небесной механике, астрономическим методам и приборам, космическим исследованиям и исследованиям в области космической геодезии.

> © ИНАСАН, 2020 © Коллектив авторов, 2020

## INASAN Science Reports. Vol 5(3). M.: Janus-K, 2020, 84 pp.

ISSN 2658-5669

## **Editorial Board**

M.E. Sachkov (Editor-in-Chief), D.S.Wiebe (Deputy Editor-in-Chief), D.V. Bisikalo, S.I. Barabanov, E.D. Kuznetsov, O.Yu. Malkov, L.I. Mashonkina, A.M. Fateeva, V.I. Shematovich, B.M. Shustov

Staff Editor E.D. Wiebe

INASAN Science Reports is a peer-reviewed journal that publishes papers in various fields of astronomy, including theoretical and observational astrophysics, planetary astronomy, galactic astronomy, solar physics, celestial mechanics, astronomical methods and tools, space research and studies related to space geodesy.

> © INASAN, 2020 © Author team, 2020

Сдано в набор 05.08.2020. Подписано в печать 14.08.2020 Формат 60х90/16. Бумага офсетная Уч.-изд. п.л. 10,5. Физ. п.л. 10,5. Тираж 100. Заказ №8652

Издательство «Янус-К» 127411, Москва, Учинская ул., д. 1

Отпечатано в ООО «ИНФОРМ-СОФТ» 119034, Москва, Еропкинский пер., д. 16

Научные труды Института астрономии РАН. Том 5 (3)

Научное издание



## Пары скоплений и двойные звездные скопления

Верещагин С.В., Сизова М.Д., Шустов Б.М.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В отличие от звезд, среди которых большинство являются двойными или кратными, двойные скопления в нашей Галактике не наблюдаются. Выводы, сделанные в работе R. de La Fuente Marcos and C. de La Fuente Marcos (2009) о том, что в диске Галактики на галактическом радиусе Солнца может быть до 12% двойных скоплений, мы считаем недостаточно корректно сформулированными. Пары скоплений, т.е. близкие, но гравитационно несвязанные системы, наблюдаются довольно часто. В работе обсуждаются такие близкие пары скоплений из солнечной окрестности радиусом 200 пк. Данные взяты из каталога MWSC (Kharchenko et al. 2013). Выделена пара скоплений Platais 8 и IC 2602, которые сблизились на расстояние 30 пк около 2 млн. лет назад и медленно расходятся в современную эпоху. Для выяснения вопроса, возможно ли образование двойных скоплений в Галактике, мы применили стохастический подход. Согласно результатам расчетов, при общем числе звездных скоплений в Галактике 10<sup>5</sup> образование двойных скоплений маловероятно.

## Binary and double star clusters

Vereshchagin S.V., Sizova M.D., Shustov B.M.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

In our Galaxy, most stars are binary or multiple ones, whereas double clusters are not observed. The conclusions of R. de La Fuente Marcos and C. de La Fuente Marcos (2009) paper that in the disk of the Galaxy at the galactic radius of the Sun can be up to 12% binary clusters we consider formulated incorrectly. Cluster pairs (double), i.e. close, but gravitationally unbound systems are observed quite often. In this paper, we discuss such close pairs of clusters from a solar neighborhood within a 200 pc. Used data are taken from the MWSC catalog (Kharchenko et al. 2013). We distinguish such a close pair of Platais 8 and IC 2602 clusters having approached each other to a distance of 30 pc about 2 million years ago and slowly flying apart nowadays. To clarify the question of whether the formation of binary clusters in the Galaxy is possible, we used a stochastic method. According to the calculation results, with a total number of star clusters in the Galaxy  $10^5$ , the probability of the formation of a double cluster is small.

**DOI:** 10.26087/INASAN.2020.5.3.001

#### 1. Введение

Считается, что примерно половина всех звезд нашей Галактики принадлежит к двойным и кратным системам [1]. Причина двойственности лежит в происхождении звезд в сгустках молекулярных облаков, как правило имеющих существенные угловые моменты. Звезды, рождаясь двойными, остаются двойными практически все время своего существования. Появление двойных звезд вследствие захвата компонента — событие крайне маловероятное.

Что касается звездных скоплений (мы обсуждаем только рассеянные звездные скопления, P3C), то в местах их формирования, гигантских молекулярных облаках, отмечается образование близко расположенных скоплений молодых звезд. Пример пары молодых звездных скоплений дан в работе [2], где эти скопления называются двойными (double). Родившись в молекулярных облаках, P3C, выжившие на ранних фазах эволюции, рассеиваются в диске Галактики, постепенно разрушаясь из-за собственной вековой эволюции и под действием галактических приливов.

Нередко возникают вопросы, связанные с терминологической путаницей в использовании термина «двойной». Впредь, пользуясь аналогией со звездами, двойными (binary) скоплениями мы будем называть только физические (гравитационно связанные) скопления, а парными (double) скоплениями — пары скоплений, находящиеся в данный момент на относительно небольшом расстоянии. Парные скопления оказывают друг на друга гравитационное влияние, приводящее к возмущениям их галактических орбит, но не могут образовать гравитационно связанную систему с замкнутыми орбитами вокруг общего центра тяжести. Поэтому мы с определенным скептицизмом относимся к положениям, изложенным в работе [3]. В работе сделаны довольно сильные заявления:

- наблюдения показывают, что доля потенциальных двойных (binary) звездных скоплений в Магеллановых Облаках составляет около 10%;
- 2. на радиусе галактической орбиты Солнца по крайней мере 12% всех РЗС, по-видимому, испытывают некоторый тип взаимодействия с другим скоплением, т. е. являются возможными двойными (binaries).

Авторы называют даже известную пару скоплений  $h + \chi$  Persei парой (double) или двойной (binary), хотя расстояние между скоплениями превышает 200 пк, и ни о какой двойственности речи быть не может. Очевидно, что здесь (и в ряде других работ, цитированных в [3]) наблюдается путаница понятий. Одна из (методических) целей данной работы — внести ясность в эти определения.

Парные скопления — тема, сравнительно мало затрагивавшаяся в литературе. Однако в последние годы с появлением большого объема качественных данных, особенно в результате проведения эксперимента Gaia, интерес к этой теме существенно возрос (см., например, [4, 5, 6]). Так, в работе [5] выявлена пара скоплений Collinder 135 и UBC7. Угловое расстояние между центрами скоплений составляет 2°, средний годичный параллакс звезд скоплений 3.310±0.004 миллисекунд дуги и  $3.563\pm0.006$  миллисекунд дуги соответственно, что дает оценку расстояния между центрами скоплений примерно 22 пк. В этой работе в разделе 2 мы кратко рассматриваем парные скопления в околосолнечной области (радиусом менее 200 пк).

Довольно часто при исследовании P3C ставятся вопросы: могут ли некоторые парные скопления, образовавшиеся одновременно в одном звездном комплексе, быть двойными? Не могут ли двойные скопления образовываться вследствие случайного блуждания? Ответы (особенно на последний вопрос) не столь очевидны, как в случае со звездами. Скопления — протяженные объекты, и при сближении часть энергии их движения может тратиться на реструктуризацию скоплений. В более населенных системах, галактиках, такие процессы, как, например, приливное трение и динамическое трение, играют большую роль. Условия, при которых (в принципе) могут образовываться двойные скопления, обсуждаются в разделе 3. Выводы представлены в разделе 4.

#### 2. Парные скопления в околосолнечной области

При поиске парных скоплений в околосолнечной области мы использовали данные о 16 РЗС из каталога Milky Way global survey of star clusters (далее — MWSC [7]). Все они расположены в пределах 200 пк от Солнца и для них имеются наблюдательные данные, как правило из Gaia DR2.

В табл. 1 приведены сведения об этих скоплениях: номер скопления по каталогу MWSC, название скопления по другим каталогам, прямое восхождение и склонение на эпоху J2000, собственные движения, расстояние от Солнца (d), лучевая скорость (RV), угловой радиус (r2), число звезд в скоплении (Nlsr2) для радиуса r2. Близкие скопления Collinder 285 (Большая Медведица) и Melotte 25 (Гиады) в каталог MWSC не входят из-за слишком больших размеров на небе. Это требует для них специальных методов обработки, отличающихся от примененных при создании MWSC.

В табл. 1 приведены сведения о скоплениях в нашу эпоху. Понятно, что на протяжении достаточно большого промежутка времени относительное расположение скоплений меняется. В работе [8] мы уделили внимание сближениям P3C с Солнечной системой, рассмотрев скопления как из ближайших окрестностей Солнца (200 пк), так и более далекие. Попутно были обнаружены сближения между скоплениями. Мы выполнили расчеты путем интегрирования уравнений движения в классической модели Галактики на 5 млн. лет назад. Для определения параметров орбит и интегрирования движения в пространстве использовался пакет galpy и классический осесимметричный потенциал Млечного Пути, наилучшим образом воспроизводящий наблюдаемую кривую вращения Млечного Пути [9]. В работе было сделано существенное допущение

MWSC Имя	Имя	$\alpha$ J2000,	$\delta$ J2000,	$\mu_{\alpha},$	$\mu_{\delta},$	d,	RV,	r2,	N1sr2
	град	град	мсд/год	мсд/год	ПК	км/с	град	111072	
2020	Melotte 111	185.985	26.3	-11.72	-8.76	87	-1.0	4.2	298
544	Mamajek 3	81.502	6.33	10	-32.24	95	13.1	2.2	40
1535	Mamajek 1	130.47	-79.045	-29.41	27.4	112	15.0	0.4	19
278	Alessi 13	52.02	-35.87	35.8	-3.27	112	19.5	3.2	209
1990	Feigelson 1	180.3	-78.335	-40.45	-3.91	117	13.7	1.0	26
305	Melotte 22	56.505	24.37	19.4	-46	130	5.5	6.2	488
1629	Platais 8	136.875	-59.16	-15	14.8	141	17.3	1.5	1377
1841	IC 2602	160.44	-64.4	-16.95	9.65	151	21.9	1.5	3229
1529	IC 2391	130.065	-53.028	-24.2	23.42	165	14.6	0.8	139
395	Platais 3	69.45	71.47	3.35	-21.15	170	7.0	2.2	174
2650	Mamajek 2	264.472	-8.085	-11.5	-20.9	174	-18.5	0.3	17
274	Melotte 20	51.675	48.8	21.49	-26.11	175	-1.4	6.1	621
1527	NGC 2632	130.095	19.69	-36.54	-13.36	187	33.4	3.1	511
1308	NGC 2451A	115.335	-38.52	-21.8	15.13	188	22.6	1.3	297
109	Platais 2	18.225	32.05	13.85	-11.29	190	6.5	1.3	64
1639	Platais 9	137.955	-43.53	-24.5	12	200	17.8	2.1	2277

Таблица 1: Данные о РЗС



Рис. 1: Расстояния  $d_{\min}$  скоплений из табл. 1 и соответствующие им моменты времени  $t_{\min}$ . Имена скоплений подписаны рядом с соответствующими черными точками.

в том, что скопления представлены точечными объектами. По ходу интегрирования вычислялись расстояния между центром скопления и Солнцем и расстояния между скоплениями. Фиксировались минимальные значения расстояний сближения d<sub>min</sub> и времена этих событий t<sub>min</sub>. Результаты представлены на рис. 1.

На рис. 1 обращает на себя внимание группирование скоплений парами. Отметим наиболее примечательные сближения пар скоплений. Кстати, эти пары практически одновременно сближались с Солнцем:

- Alessi 13 и Матајек 3 в момент времени  $t_{\min} = -3.00$  млн. лет сближалась с Солнцем на 75 пк и 60 пк соответственно, при этом двигаясь параллельно друг другу на расстоянии 89 пк;
- Melotte 20 и Mamajek 2 в настоящий момент проходят мимо Солнца на расстоянии 174 пк практически одновременно, но не сближаются между собой, проходя мимо Солнца с разных сторон на расстоянии более 300 пк;
- Platais 8 и IC 2602 сближались на 30 пк около 2 млн. лет назад.

Таким образом, скопления могут сближаться на довольно малые расстояния. Могут ли такие сближения привести к образованию двойных скоплений? Этот вопрос мы рассмотрим в следующем разделе.

#### 3. Условия образования РЗС

Приливной радиус скопления, определямый приливным воздействием Галактики

$$R_{\rm C} = R_{\rm G} \sqrt[3]{\frac{M_{\rm c}}{M_{\rm G}}},\tag{1}$$

где  $R_{\rm C}$  и  $M_{\rm C}$  — радиус и масса скопления,  $R_{\rm G}$  и  $M_{\rm G}$  — то же для Галактики. Приняв  $R_{\rm G} = 8$  кпк,  $M_{\rm G} = 10^{11} M_{\odot}$  для скопления массой  $1000 M_{\odot}$  получаем значение радиуса ~ 17 пк. Эта величина слабо зависит от отношения масс Галактики и скопления, так что при всех разумных оценках для скоплений массой  $100 - 1000 M_{\odot}$  можно вполне брать за ориентир значения  $R_{\rm C} = 10 - 20$  пк, соответственно. Важной характеристикой условий сближения также является относительная скорость скоплений. Чтобы скопления считались гравитационно связанными, эта скорость не должна превышать

$$V_{\rm \kappa pur} = \sqrt{\frac{GM_c}{R}},\tag{2}$$

где R — расстояния между центрами скоплений. Для пары скоплений массой  $1000M_{\odot}$ , находящихся на расстоянии 20 пк, значение  $V_{\rm крит}$  составляет 0.47 км/с. Для других значений  $M_{\rm C}$  и R значение  $V_{\rm крит}$  легко прошкалировать. Но не все сочетания возможны. Нужно помнить про формулу 1, связывающую радиус и массу скопления. Например, скопление массой  $100M_{\odot}$  и радиусом 20 пк просто не сможет существовать, т.к. будет быстро разрушено силой галактического прилива. В любом случае, критические значения скорости невелики по сравнению с типичными хаотическими скоростями РЗС. Обычно принимают, что дисперсия скоростей РЗС на расстоянии Солнца от центра Галактики составляет ~ 10 км/с [10].

Может ли относительная скорость в парах скоплений быть ниже ~ 0.5 км/c? Применив стохастический метод, использованный нами в работе [11] мы пришли к довольно очевидному заключению: скопления не только в окрестности Солнца, но и в гораздо большем объеме (точнее, для полного числа известных P3C, ~ 4 тысячи [12]), практически не попадают в диапазон «расстояние-относительная скорость», соответствующий условию гравитационной связанности, хотя во всем ансамбле из  $10^5$  P3C такие эпизоды исключить нельзя. Еще один вывод — сближения между P3C на расстояния 20 - 30 пк — вполне обычное явление. В среднем распределение по расстояниям в парах скоплений в стохастической модели и в наблюдениях (в данном случае по скоплениям из табл. 1) близки.

### 4. Выводы

В работе обсуждаются близкие пары скоплений из солнечной окрестности радиусом 200 пк. Данные взяты из каталога MWSC. Выделена пара скоплений Platais 8 и IC 2602, которые сблизились на расстояние 30 пк около 2 млн. лет назад и медленно расходятся в современную эпоху. Согласно результатам расчетов по стохастической модели образование двойных скоплений маловероятно за все время жизни Галактики. Выводы, сделанные в работе [3] о том, что в диске Галактики на галактическом радиусе Солнца может быть до 12% двойных (binary) скоплений, мы считаем недостаточно корректно сформулированными.

В этом исследовании использовалась база данных SIMBAD, CDS, Страсбург, Франция, «Астрономическая база данных SIMBAD». Мы также благодарны за полезные советы Дж. Бови из Департамента астрономии и астрофизики Университета Торонто, в частности, об использовании пакета galpy. Исследование частично выполнено при финансовой поддержке РФФИ и DFG в рамках научного проекта № 20-52-12009. Б.М. Шустов благодарит РНФ за поддержку грантом 19-71-20089.

#### Список литературы

- A. V. Tutukov and L. R. Iungelson, in M. J. Plavec, D. M. Popper, and R. K. Ulrich, eds., Close Binary Stars: Observations and Interpretation, IAU Symposium, volume 88, 15–22 (1980).
- 2. J. L. Yun, A. A. Djupvik, A. J. Delgado, and E. J. Alfaro, A&A, 483, 209, 2008.
- 3. R. de La Fuente Marcos and C. de La Fuente Marcos, A&A, 500, L13, 2009.
- Binary cluster collinder 1352019, URL 4. Е. Postnikova and D. Kovaleva, open and ubc7, https://basis-foundation.ru/img/docs/summer-school/posters/Postnikova.pdf.
- A. Castro-Ginard, C. Jordi, X. Luri, F. Julbe, M. Morvan, L. Balaguer-Núñez, and T. Cantat-Gaudin, A&A, 618, A59, 2018.
- 6. P. Zeidler, A. Nota, E. Sabbi, E. K. Grebel, et al., in C. Charbonnel and A. Nota, eds., Formation, Evolution, and Survival of Massive Star Clusters, IAU Symposium, volume 316, 55–60 (2017).
- 7. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser, and R. D. Scholz, A&A, 558, A53, 2013.
- 8. M. D. Sizova, S. V. Vereshchagin, B. M. Shustov, and N. V. Chupina, Astron. Rep., 97, in press, 2020.
- 9. J. Bovy, *ApJS*, **216**, 29, 2015.
- 10. C. Soubiran, T. Cantat-Gaudin, M. Romero-Gómez, L. Casamiquela, et al., A&A, 619, A155, 2018.
- 11. B. M. Shustov, S. V. Vereshchagin, and M. D. Sizova, INASAN Science Reports, 5, 89, 2020.
- 12. A. E. Piskunov, N. V. Kharchenko, S. Röser, E. Schilbach, and R. D. Scholz, A&A, 445, 545, 2006.

# О стохастическом подходе к оценке частоты сближений звезд и звездных скоплений с Солнцем

Шустов Б.М., Верещагин С.В., Сизова М.Д.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Неизбежные сближения звезд и звездных скоплений с Солнечной системой до критических расстояний оказывали и будут оказывать существенное воздействие на динамику тел в облаке Оорта, вызывая, в частности, появление новых долгопериодических комет. Частоту таких появлений нужно учитывать, в частности, в анализе проблемы астероидно-кометной опасности. В данной работе на основе стохастического моделирования движений звезд и скоплений в окрестности Солнечной системы получена зависимость частоты сближений со звездами от «прицельного расстояния»  $d_{\min}$ . Для  $d_{\min} = 0.5, 1, 2$  пк частота сближений составляет 4, 16 и 64 событий за млн. лет соответственно. Сближения скоплений с Солнечной системой на  $d_{\min} = 10$  пк происходят с частотой несколько раз за млрд. лет.

## On a stochastic method for evaluating the approach frequency of stars and Solar system

Shustov B.M., Vereshchagin S.V., Sizova M.D.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The unavoidable approaches of stars and star clusters to the Solar system on critical distances produce a significant impact both in the past and in the future on the dynamics of bodies in the Oort cloud, causing, in particular, the appearance of new long-period comets. The frequency of such approaches must be taken into account also in the analysis of the asteroids and comets hazard problem. In this work, we obtained the dependence of star approaches frequency on the "closest distance"  $d_{\min}$  using stochastic modeling of the movements of stars and clusters in the vicinity of the Solar system. For  $d_{\min} = 0.5, 1, 2$  pc, the frequency of approaches is 4, 16, and 64 events per million years respectively. Rapprochement of clusters with the Solar system at  $d_{\min} = 10$  pc occurs several times over a billion years.

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.3.002

## 1. Введение

Столкновения астероидов и комет с Землей сыграли важную роль в эволюции Земли, в том числе и как обитаемой планеты. Считается, что кометы сыграли важную роль в поставке воды и пребиотических органических соединений, необходимых для происхождения жизни на Земле [1]. Кроме того, в наши дни кометы (особенно долгопериодические, предсказать появление которых невозможно) также рассматриваются как объекты, которые необходимо учитывать в анализе проблемы астероидно-кометной опасности [2]. Поэтому механизм появления долгопериодических комет вызывает научный интерес.

Резервуаром долгопериодических комет является облако Оорта (см., например, [3]). Поскольку кометы в облаке Оорта гравитационно слабо связаны с Солнцем, их орбиты могут испытывать относительно сильные возмущения от сближений с различными компактными гравитирующими массами (молекулярными облаками, звездными скоплениями, звездами, межзвездными телами дозвездной массы — коричневыми карликами, межзвездными планетами). Некоторые такие сближения могут вызывать, в частности, временное увеличение потока комет, попадающих во внутреннюю Солнечную систему, т.н. «кометные ливни». Мы не рассматриваем здесь влияние т.н. галактических приливов на Солнечную систему, хотя в общем плане оно также существенно (см., например, недавнюю работу [4] и ссылки в ней). Силы галактических приливов мало меняются во времени, а в данной работе нас интересуют именно заметные и достаточно частые локальные возмущения гравитационного поля. Мы также не рассматривали сближения с молекулярными облаками. В обычных условиях этот эффект не столь существенен, по сравнению со звездными сближениями [5, 6], хотя при определенных условиях (движение Солнечной системы в плотном гигантском молекулярном облаке между многочисленными массивными сгустками) эффект от таких сближений может быть значительным [7]. Что касается коричневых карликов и межзвездных планет, то пока что наблюдательная статистика таких объектов весьма неполна. Возможно, что их количество относительно невелико по сравнению со звездами [8]. Также существенно, что массы таких объектов относительно малы и существенное влияние могут оказать только сближения на малые расстояния, а такие сближения весьма редки. Поэтому мы ограничились рассмотрением сближений со звездами и рассеянными звездными скоплениями. Шаровых скоплений в Галактике как минимум на пару порядков меньше, чем рассеянных, и их учет общую картину вряд ли изменит.

Вопрос о сближениях Солнечной системы со звездами (или наоборот) привлекает внимание исследователей уже многие десятилетия, начиная с классической работы Оорта [9], в которой не только была высказана идея о существовании в Солнечной системе весьма протяженного почти сферического облака кометообразных тел, но и предложен механизм подкачки комет из этого облака в класс долгопериодических комет из-за сближений со звездами. Различным аспектам проблемы посвящено много работ (см. например, обзоры по этому вопросу в [4, 10, 11]). Отметим, что относительно недавние работы в основном посвящены изучению сближений с конкретными объектами. Например, в работе [12, 13] рассматриваются (прогнозируются) будущие сближения Солнечной системы со звездами карликами в окрестности Солнца. С появлением новых массивов высокоточных данных, в частности в результате проведения эксперимента GAIA, интерес к этой теме еще более вырос (см. [14, 15]). Методы моделирования сближений Солнца со звездами из заданного объема применяются, как правило, с опорой на каталоги, содержащие данные наблюдений. В работе [14] использованы данные о 7.2 млн. звезд из второго релиза GAIA, для которых есть все данные в 6-мерном фазовом пространстве. Это дает хорошую основу для моделей, но только в том случае, если данные каталогов полны.

Чтобы представлять «а что же должно быть», мы в данной работе использовали простой метод стохастического моделирования движения частиц (звезд и скоплений) в некотором галактическом объеме. По сути этот метод похож на сложный стохастический метод, использованный в [16], но зато в отличие от сложных моделей он позволяет ощутить основные закономерности «на пальцах» и легко шкалировать результаты.

Мы не привязывались к конкретным каталогам звезд или скоплений, а исходили из самых общих, но надежных оценок концентрации звезд в галактическом диске и дисперсии скоростей. Что касается рассеянных скоплений, то здесь общие оценки менее надежны. В качестве принятого значения основного параметра числа рассеянных звездных скоплений в галактическом диске — мы опираемся на оценку в 10<sup>5</sup>, впервые полученную в [17]. Дисперсию скоростей скоплений считаем равной 10 км/с, как у молекулярных облаков, в которых эти скопления образуются. Более подробно начальные условия, постановка и метод решения задачи описаны в разделе 2. В разделе 3 приведены основные результаты. Сравнение использованного подхода и полученных результатов с результатами других авторов и выводы приведены в разделе 4.

#### 2. Постановка задачи и начальные условия

Сближения с компактными гравитирующими массами — события, частота и эффективность которых связаны. Под эффективными сближениями мы будем понимать такие сближения, которые приводят к существенному изменению скорости комет в афелии. Изменение как минимум должно быть таким, чтобы кометы облака Оорта, у которых, согласно представлениям о механизме их происхождения, перигелийные расстояния превышают значение  $p_0 = 15$  а.е., а в результате возмущения орбиты они могли появиться в зоне с перигелийным расстоянием, не превышающим  $p_1 = 5$  а.е. Легко показать, что для этого необходимо, чтобы изменение (в данном контексте — уменьшение) скорости кометы в афелии было не меньше, чем

$$\Delta v_{\rm crit} = (v_{\rm a_1} - v_{\rm a_0}) = \frac{\sqrt{GM_{\odot}}}{a} (\sqrt{p_1} - \sqrt{p_0}), \tag{1}$$

где  $v_{a_0}$  и  $v_{a_1}$  — скорости кометы в афелиях на орбитах с перигелийными расстояниями  $p_0$  и  $p_1$  соответственно, a — афелийное расстояние, а  $M_{\odot}$  — масса Солнца. Мы выбрали максимальное значение для афелийного расстояния объектов облака Оорта —  $10^5$  а.е. или 0.5 пк. Это естественный размер Солнечной системы, т.к. на больших расстояниях приливные силы от внешних гравитирующих объектов эффективно «обдирают» Солнечную систему. При этом получаются следующие значения скоростей  $v_{a_0} = 1.63$  м/с и  $v_{a_1} = 0.93$ м/с, а значение  $\Delta v_{crit} = 0.70$  м/с. Для оценки изменения скорости  $\Delta v$  вследствие приливного воздействия от гравитирующих тел, сближающихся с Солнечной системой, обычно используют формулу

$$\Delta v = \frac{2GM_*a}{d_{\min}^2 V},\tag{2}$$

где  $d_{\min}$  — минимальное расстояние сближения с Солнцем, a — афелийное расстояние кометы, G — гравитационная константа,  $M_*$  — масса гравитирующего тела (например, звезды), сближающегося с Солнцем. Из условия  $\Delta v = \Delta v_{\rm crit}$  легко получить оценку  $d_{\min}$ , т.е. расстояние, при прохождении на котором тело массой  $M_*$  может вызвать возмущения скорости комет в облаке Оорта, которые могут перевести часть комет на более вытянутые орбиты, т.е. вызвать появление «новых» комет, либо выбросить их из Солнечной системы в межзвездное пространство. При массе сближающегося тела  $M_* = 1 M_{\odot}$  значение  $d_{\min}$  получается очень близким к 0.5 пк, что вполне согласуется с представлениями о механизме, ограничивающем размеры облака Оорта.

Частота сближений Солнца со звездами (скоплениями) в галактическом диске зависит от объемной плотности звезд (скоплений)  $\rho_*$  в окрестностях Солнца и от дисперсии скоростей  $\sigma_{\nu}$  этих объектов в данном объеме. Частоту сближений можно легко оценить «на пальцах». Однако стохастическая модель дает более наглядное представление о процессе, позволяет лучше оценить распределение числа сближений по  $d_{\min}$  и т.д. Поэтому мы построили простую модель случайных блужданий частиц в заданном кубическом объеме со стороной L. Количество частиц N приведено для сведения, оно, конечно, согласовано с L и с  $\rho_*$ . Частицы

Вариант	$ ho_*,$ пк $^{-3}$	$d_{\min},$ пк	$\sigma_{ u},$ км/с	L, пк	N
1. Звезды поля массой $1 M_{\odot}$	0.1	0.5	30	20	1000
2. Рассеянные скопления	$1 \times 10^{-6}$	15	10	1000	1000
массой $1000 M_{\odot}$					
3. Звезды скопления массой	0.8	0.5	1	10	1000
$1 M_{\odot}$ каждая					

Таблица 1: Параметры моделей

считались невзаимодействующими между собой. Граничное условие (действие при достижении частицей границы объема) заключалось в диффузном отражении частицы от «стенки». В табл. 1 приведены значения параметров моделей.

## 3. Результаты

На рис. 1 показано модельное распределение звезд поля (вариант 1) в плоскости X - Y (координаты в плоскости Галактики) в начальный момент времени. Солнце находится в центре картинки. Интегрирование движений проводилось без учета взаимного тяготения сближающихся тел, поэтому вычисления протекали очень быстро. В процессе интегрирования определялись наименьшие расстояния, на которые сближалась каждая звезда с Солнцем. На рис. 2 (левая панель) проиллюстрировано распределение точек максимального сближения с Солнцем, достигнутых различными звездами на протяжении 2 млн. лет.

На рис. 2 (правая панель) представлена зависимость частоты сближений от «прицельного» расстояния  $d_{\min}$  (на графике r) до Солнца. Эту зависимость можно использовать, например, для оценки частоты сближений Солнечной системы со звездами на критическое расстояние (0.5 пк, см. обсуждение выше). Вывод вполне очевиден — критические сближения происходят несколько раз (здесь 4) в течение млн. лет. Отметим,



Рис. 1: Распределение звезд поля (вариант 1) в плоскости *X*-*Y*. Показаны векторы скоростей. Для масштаба нанесены круги радиусом 2 и 0.5 пк.



Рис. 2: Распределение точек максимального сближения звезд с Солнцем, на протяжении 2 млн. лет (левая панель). Частота сближений звезд с Солнцем в зависимости от расстояния сближения.

что соблюдается квадратичная зависимость частоты от радиуса, что подтверждает математическую состоятельность модели. Поскольку частота сближений пропорциональна  $a^2$ , очень тесные сближения, которые могут вызвать перевод кометного тела из транснептуновой области в зону p < 5 a.e., маловероятны за все время жизни Солнечной системы.

Очевидно, что при изменении значений входных параметров модели (см. табл. 1) основные результаты можно легко прошкалировать. Не описывая детали расчета в вариантах 2 и 3, представим основные результаты:

- Вариант 1 сближения со звездными скоплениями на расстояние 20 пк могут происходить с частотой ~ 15 раз в млрд. лет.
- Вариант 2 сближения со звездами внутри звездного скопления на 0.5 пк происходят реже чем со звездами поля, поскольку частота сближений пропорциональна ρ<sub>\*</sub>σ<sub>ν</sub>. Но если обсуждать влияние таких сближений, то простыми оценками здесь не обойтись. Формула 2 применима лишь при a < d<sub>min</sub>, а в скоплениях это условие не выполняется.

## 4. Краткое обсуждение

Здесь мы лишь очень кратко коснемся двух вопросов, связанных со звездными сближениями с Солнечной системой. Многие авторы изучали вопрос о динамическом влиянии окружения молодого Солнца на Солнечную систему (см., например, [18, 19, 20]). Если Солнце находилось в скоплении, то, согласно результатам расчета в варианте 3, сближения происходили с частотой примерно раз в млн. лет, и при времени жизни скопления 50 млн. лет, Солнечная система могла испытать несколько десятков сближений. Как уже отмечалось, здесь применение простой модели ограничено.

Несмотря на простоту нашего подхода, он дает результаты вполне надежные. В работе [21] по скорректированным данным HIPPARCOS получено, что Солнце испытывало 11.7 ± 1.3 сближений на расстояние до 1 пк за 1 млн. лет. В работе [16] по данным второго релиза GAIA получена оценка 19.7 ± 2.2 за 1 млн. лет. У нас значение этой частоты составляет 16 (см. рис. 2, правую панель). Неплохое согласие! В работе [16] построена сложная модель движения Солнца в Галактике (учитывающая возможную радиальную миграцию Солнца). В расчетах без миграции авторы получили частоту сближений на расстояние 2 пк — 66 сближений за 1 млн. лет. Согласно нашей простой модели, значение частоты сближений на 2 пк составило 64 (см. рис. 2, правую панель). Согласие тоже можно считать приемлемым.

Основной вывод работы состоит в том, что наша простая стохастическая модель дает быстрый, гибкий инструмент для получения надежных оценок частоты сближений Солнца с компактными галактическими объектами.

Исследование частично выполнено при финансовой поддержке РФФИ и DFG в рамках научного проекта № 20-52-12009. Б.М. Шустов благодарит РНФ за поддержку грантом 19-71-20089.

#### Список литературы

- 1. P. J. Thomas, R. D. Hick, C. F. Chyba, and C. P. McKay, Comets and the Origin and Evolution of Life (2006).
- 2. B. M. Shustov, Herald of the Russian Academy of Sciences, 89, 311, 2019.
- 3. V. V. Emel'yanenko, D. J. Asher, and M. E. Bailey, MNRAS, 381, 779, 2007.
- 4. S. Torres, M. X. Cai, A. G. A. Brown, and S. Portegies Zwart, A&A, 629, A139, 2019.
- 5. L. Biermann, in A. Reiz and T. Andersen, eds., Astronomical Papers Dedicated to Bengt Strongren, 327–336 (1978).
- 6. M. Jakubik and L. Neslušan, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnate Pleso, 39, 85, 2009.
- 7. O. A. Mazeeva, Solar System Research, 38, 325, 2004.
- 8. R. D. Jeffries, in C. Reylé, C. Charbonnel, and M. Schultheis, eds., *EAS Publications Series*, *EAS Publications Series*, volume 57, 45–89 (2012).
- 9. J. H. Oort, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands, 11, 91, 1950.
- H. Rickman, M. Fouchard, C. Froeschlé, and G. B. Valsecchi, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 102, 111, 2008.
- 11. C. A. L. Bailer-Jones, A&A, 575, A35, 2015.
- 12. V. V. Bobylev, Astronomy Reports, 61, 883, 2017.
- 13. F. Feng and C. A. L. Bailer-Jones, MNRAS, 454, 3267, 2015.
- 14. C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, R. Andrae, and M. Fouesneau, A&A, 616, A37, 2018.
- 15. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, Astronomy Letters, 43, 559, 2017.
- 16. C. A. Martínez-Barbosa, L. Jílková, S. Portegies Zwart, and A. G. A. Brown, MNRAS, 464, 2290, 2017.
- 17. A. E. Piskunov, N. V. Kharchenko, S. Röser, E. Schilbach, and R. D. Scholz, A&A, 445, 545, 2006.
- 18. T. Nordlander, H. Rickman, and B. Gustafsson, A&A, 603, A112, 2017.
- 19. N. A. Kaib and T. Quinn, *Icarus*, **197**, 221, 2008.
- 20. D. Malmberg, F. de Angeli, M. B. Davies, R. P. Church, D. Mackey, and M. I. Wilkinson, MNRAS, 378, 1207, 2007.
- J. García-Sánchez, P. R. Weissman, R. A. Preston, D. L. Jones, J. F. Lestrade, D. W. Latham, R. P. Stefanik, and J. M. Paredes, A&A, 379, 634, 2001.

# Миграция планетезималей из зоны питания планет-гигантов к планетам земной группы и Луне

## Маров М.Я., Ипатов С.И.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

Рассмотрена миграция планетезималей с различных (от 2.5 до 40 а.е.) расстояний от Солнца и вероятности столкновений таких планетезималей с планетами земной группы и Луной. Учитывалось гравитационное влияние 7 планет (от Венеры до Нептуна) или 5 планет (от Венеры до Сатурна). Начальные значения больших полуосей орбит планетезималей варьировались от  $a_{\min}$  до  $a_{\max}$ . В наших расчетах  $a_{\max} = a_{\min} + 2.5$  а.е. и  $a_{\min}$  варьировалось с шагом 2.5 а.е. от 2.5 до 40 а.е. Начальные эксцентриситеты  $e_0$  орбит планетезималей равнялись 0.05 или 0.3. Начальные наклонения орбит равнялись  $e_0/2$  рад. Элементы орбит мигрировавших планетезималей записывались в компьютерную память с шагом равным 500 лет. Основываясь на этих массивах элементов орбит, мы вычисляли вероятности столкновений планетезималей с планетами земной группы, Луной и их зародышами. Расчеты показали, что количество материала, доставленного из-за орбиты Юпитера на Землю, может превышать массу земных океанов. Некоторая часть (возможно 1/3) этого материала состояла из воды и летучих веществ. Общая масса планетезималей, мигрировавших из-за орбиты Юпитера и столкнувшихся с Луной, была в 16 или 17 раз меньше, чем при столкновениях этих тел с Землей. Масса вещества, доставленного на планету, к массе планеты для Марса была примерно в два раза больше, чем для Земли, и такие отношения для Меркурия и Венеры были немного больше, чем для Земли. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

## Migration of planetesimals from the feeding zone of the giant planets to the terrestrial planets and the Moon

Marov M.Ya., Ipatov S.I.

V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the RAS, Moscow, Russia

We considered the migration of planetesimals from different (from 2.5 to 40 AU) distances from the Sun and the probability of collisions of such planetesimals with the terrestrial planets and the Moon. The gravitational influence of 7 planets (from Venus to Neptune) or of 5 planets (from Venus to Saturn) was taken into account. Initial semi-major axes of orbits of planetesimals varied from  $a_{\min}$  to  $a_{\max}$ . In our calculations  $a_{\max} = a_{\min} + 2.5$  AU and  $a_{\min}$  varied with a step of 2.5 AU from 2.5 to 40 AU. Initial eccentricities  $e_0$  of planetesimals equaled to 0.05 or 0.3. Initial inclinations  $i_0$  equaled to  $e_0/2$  rad. The orbital elements of migrated planetesimals were recorded in computer memory with a step of 500 years. Based on these arrays of the orbital elements, we calculated the probabilities of collisions of planetesimals with the terrestrial planets, the Moon, and their embryos. The calculations showed that the amount of material delivered from beyond the Jupiter's orbit to the Earth could exceed the mass of Earth's oceans. Some fraction (may be 1/3) of this material was composed of water and volatiles. The total mass of planetesimals migrated from beyond the Jupiter's orbit and collided with the Moon was by a factor of 16 or 17 smaller than that for the Earth. The mass of the material delivered to a planet to the mass of the planet for Mars was about two times greater than that for the Earth, and such ratios for Mercury and Venus were a little greater than that for the Earth. Resented at the XI International Conference "Near-Earth Astronomy and Space Heritage" (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

**DOI:** 10.26087/INASAN.2020.5.3.003

## 1. Введение

Актуальность задачи доставки воды и летучих к планетам земной группы обусловлена тем, что Земля и планеты земной группы формировались в высокотемпературной (~ 1000°K) зоне протопланетного диска, где вода и летучие не удерживались, а сосредотачивались за «снеговой линией» на расстоянии R > 3.5 а.е. Вода и летучие важны для зарождения и эволюции жизни в Солнечной системе и во внесолнечных системах [1, 2]. Вода в океане Земли и ее отношение D/H могут быть результатом смешивания воды из нескольких экзогенных и эндогенных источников с высоким и низким отношениями D/H. Эндогенные источники воды могли включать прямую адсорбцию водорода из небулярного газа в расплавы магмы с последующей реакцией водорода H<sub>2</sub> с оксидом железа FeO и аккумуляцию воды частицами протопланетного диска до начала диссипации газа во внутренней части ранней Солнечной системы, которые могли увеличить отношение D/H дейтерия к водороду в океанах Земли. Экзогенные источники включали миграцию тел из внешней части главного пояса астероидов и миграцию планетезималей из-за орбиты Юпитера. В ряде работ внешний пояс астероидов рассматривался как основной источник воды на Земле. Обзор публикаций по рассматриваемой проблеме приведен в [3].

Ранее мы изучали миграцию тел с начальными орбитами, близкими к известным кометам семейства Юпитера [4, 5, 6, 7], и миграцию планетезималей из зоны с начальными большими полуосями орбит от 4.5 до 12 а.е. [3]. Ниже рассматривается миграция планетезималей с расстояний от 2.5 до 40 а.е. и вероятности

$a_{\min}$ , a.e. $e_0 = 0.3$ $e_0 = 0.05$	$2.5 \\ 5 \cdot 10^{-5} \\ 2 \cdot 10^{-2}$	$5 \\ 4 \cdot 10^{-6} \\ 6 \cdot 10^{-6}$	7.5 3.8 $\cdot$ 10 <sup>-4</sup> 2 $\cdot$ 10 <sup>-6</sup>	$10 \\ 2 \cdot 10^{-6} \\ 3 \cdot 10^{-5}$
$a_{\min}$ , a.e. $e_0 = 0.3$ $e_0 = 0.05$	$15 \\ 1 \cdot 10^{-6} \\ 1 \cdot 10^{-6}$	$20 \\ 6 \cdot 10^{-7} \\ 2 \cdot 10^{-6}$	$ \begin{array}{c} 30 \\ 6 \cdot 10^{-7} \\ 6 \cdot 10^{-7} \end{array} $	$ \begin{array}{c} 40 \\ 1 \cdot 10^{-6} \\ 8 \cdot 10^{-7} \end{array} $

Таблица 1: Вероятность  $p_{\rm E}$  столкновения планетезимали с Землей при  $n_{\rm pl}=7$  (среднее значение при рассмотрении примерно 2000 планетезималей)

их столкновений с Землей и Луной. Цель — количественно оценить объемы воды и летучих, доставленных к Земле, Луне и планетам земной группы.

### 2. Исходная модель

В одной из серий расчетов начальные значения  $a_0$  больших полуосей орбит планетезималей варьировались от  $a_{\min}$  до  $a_{\min} + 2.5$  а.е.; число начальных планетезималей было пропорционально  $a_0^{1/2}$ . В другой серии расчетов начальные значения больших полуосей орбит всех планетезималей были равны  $r_f$ . Для обеих серий расчетов значения  $a_{\min}$  и  $r_f$  варьировались от 2.5 до 40 а.е. с шагом, равным 2.5 а.е. Начальные эксцентриситеты  $e_0$  орбит планетезималей приняты равными 0.05 или 0.3. Значения  $e_0 = 0.3$  могли быть обусловлены гравитационным влиянием планетезималей и зародышей планет при эволюции диска планетезималей в зоне питания планет-гигантов [8, 9, 10]. Начальные наклонения орбит планетезималей приняты равными  $e_0/2$ рад.

В обеих сериях расчетов рассматривалась миграция планетезималей под гравитационным влиянием  $n_{\rm pl} = 7$  планет (от Венеры до Нептуна) или  $n_{\rm pl} = 5$  планет (от Венеры до Сатурна). Численное интегрирование производилось с использованием симплектического интегратора из пакета Swift [11]. Интегрирование для планетезимали производилось вплоть до ее ухода на 2000 а.е. от Солнца или ее столкновения с Солнцем. Некоторые расчеты были остановлены через несколько десятков млн. лет (обычно после более чем 100 млн. лет, до 4.6 млрд. лет), если вероятность  $p_{\rm E}$  столкновения планетезимали с Землей не менялась в течение некоторого длительного времени и в диске оставалось небольшое количество планетезималей. Элементы орбит мигрировавших планетезималей записывались в память ЭВМ с шагом в 500 лет. На основании массивов этих элементов были рассчитаны вероятности столкновения планетезимали с Землей  $p_{\rm E}$ , с Луной  $p_{\rm M}$ , зародышами Земли и Луны и с планетами земной группы.

#### 3. Результаты расчетов

В вариантах расчетов с 250 планетезималями значения  $p_{\rm E}$  для расчетов с одинаковыми начальными орбитами, но с другим шагом интегрирования могут отличаться более чем в несколько десятков раз. Например, при серии расчетов с  $a_{\rm min} = 5$  а.е. и  $e_0 = 0.3$  значение  $p_{\rm E}$  варьировалось от  $2.4 \cdot 10^{-7}$  до  $8.5 \cdot 10^{-6}$  для разных расчетов, а  $p_{\rm E} = 4.1 \cdot 10^{-6}$  для серии из 8 расчетов с 2000 планетезималями. Для серии расчетов с  $a_{\rm min} = 7.5$  а.е. и  $e_0 = 0.3$  в одном расчете получено  $p_{\rm E} = 5.2 \cdot 10^{-7}$ , в другом расчете  $p_{\rm E} = 2.64 \cdot 10^{-3}$ , и  $p_{\rm E} = 3.8 \cdot 10^{-4}$  для серии из 7 расчетов с 1750 планетезималями. При рассмотрении тысяч планетезималей с  $5 \le a_{\rm min} \le 10$  а.е. среднее значение  $p_{\rm E}$  может быть больше, чем  $2 \cdot 10^{-6}$ , по крайней мере в несколько раз. Вышеуказанные значения  $p_{\rm E}$  были получены при  $n_{\rm pl} = 7$ . Для  $n_{\rm pl} = 5$  средние значения  $p_{\rm E}$  при  $a_{\rm min} = 5$  а.е. и  $a_{\rm min} = 7.5$  а.е. равнялись  $1.7 \cdot 10^{-6}$  и были меньше, чем при  $n_{\rm pl} = 7$ .

Для расчетов с  $a_{\min} = 2$  а.е. и  $r_f = 2.5$  а.е. (то есть для планетезималей в астероидном поясе) значения  $p_{\rm E}$  были порядка  $10^{-3}$ , то есть были намного больше, чем для планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии более 5 а.е. от Солнца. Значения  $p_{\rm E}$  обычно были больше при меньшем значении  $a_{\min}$  (см. табл. 1). При  $a_{\min} = 12.5$  а.е. среднее значение  $p_{\rm E}$  равнялось  $1.7 \cdot 10^{-6}$  для 750 планетезималей. Для больших расстояний от Солнца (в среднем для области 20–40 а.е.) и рассмотрении тысяч планетезималей значение  $p_{\rm E}$  составляет около  $10^{-6}$ , хотя для некоторых серий расчетов с 250 планетезималями  $p_{\rm E}$  меньше  $10^{-6}$ . Эта область также могла сыграть важную роль в миграции ледяных тел на Землю.

При общей массе планетезималей в зоне питания Юпитера и Сатурна, равной 100 массам Земли, и при  $p_{\rm E} = 2 \cdot 10^{-6}$  общая масса планетезималей, столкнувшихся с Землей, равна массе земных океанов. Значение  $p_{\rm E}$  могло в несколько раз превышать  $2 \cdot 10^{-6}$ . Некоторая часть (вероятно около 1/3) состава планетезималей могла приходиться на воду и летучие. Некоторые планетезимали, содержащие воду, пришли к Земле из-за орбиты Сатурна.

Планетезимали, приходившие из-за орбиты Юпитера, могли выпадать на Землю и Луну в процессе их роста, и вещество, включая воду и летучие вещества, доставленные из-за орбиты Юпитера, было включено

во внутренние слои Земли и Луны. Доставка вещества на Землю и Луну из зоны Урана и Нептуна зависела от того, когда эти гигантские планеты приобрели большие массы и начали двигаться по орбитам, близким к современным орбитам. После того, как планетезимали из этой зоны начали испытывать значительное влияние этих планет-гигантов, характерное время до выпадения планетезималей на Землю и Луну часто не превышало 20 млн. лет, но небольшая часть планетезималей могла выпадать на Землю через сотни млн. лет.

Рассчитанная вероятность  $p_{\rm M}$  столкновения с Луной планетезимали, мигрировавшей из-за орбиты Юпитера, была примерно в 16–17 раз меньше вероятности  $p_{\rm E}$  столкновения планетезимали с Землей. Из-за меньшей массы Луны доля вещества, испарившегося и выброшенного с Луны при столкновениях с ней планетезималей, была больше, чем при столкновениях с Землей. Это дополнительно уменьшает массу доставленных на Луну воды и летучих. Вероятность  $p_{\odot}$  столкновения планетезимали с Солнцем была существенной только для планетезималей в астероидном поясе. При  $e_0 = 0.3$  она составляла 0.17 для  $a_{\min} = 2$  а.е., 0.04 для  $a_{\min} = 2.5$  а.е. и 0.76 для  $r_f = 2.5$  а.е. Для всех других расчетов  $p_{\odot} < 0.01$ , а  $p_{\odot} = 0$  для большинства расчетов для  $a_{\min}$  или  $r_f$  не меньших 5 а.е. (для области за орбитой Юпитера).

Для сильно эксцентричной орбиты планетезимали вероятность ее столкновения с планетой  $p_{\rm pl} \propto m_{\rm pl}^{2/3}$  ( $m_{\rm pl}$  — масса планеты); поэтому отношение  $p_{\rm pl}/m_{\rm pl}$  больше для меньших масс планет. Согласно расчетам масса воды, полученной Марсом за счет планетезималей, мигрировавших из-за орбиты Юпитера, в расчете на единицу массы планеты была примерно в два-три раза больше, чем для Земли. В абсолютных значениях масса воды, доставленной на Марс, была в 3–5 раз меньше массы воды, доставленной на Землю [3]. Масса воды, доставленной к Венере и Меркурию, рассчитанная на единицу массы планеты, была немного больше, чем для Земли. Полученные оценки свидетельствуют в пользу существования древних океанов на Марсе и Венере [12].

## 4. Заключение

Вероятности столкновений планетезималей, приходивших из-за орбиты Юпитера, с Землей, рассчитанные для 250 планетезималей, могут отличаться в несколько десятков раз для разных вариантов расчетов с почти одинаковыми орбитами. При рассмотрении тысяч планетезималей вероятность столкновения планетезимали с Землей для начальных значений их больших полуосей орбит между 5 и 10 а.е. может превышать  $2 \cdot 10^{-6}$ , по крайней мере, в несколько раз. В среднем для области между 20 и 40 а.е.  $p_{\rm E}$  может быть около  $10^{-6}$ . Для планетезималей, мигрировавших из главного пояса астероидов,  $p_{\rm E} \sim 10^{-4} - 10^{-2}$ , т.е. намного больше. Масса воды, доставленной планетезималями из-за орбиты Юпитера, могла достигать массы земных океанов.

Отношение вероятностей столкновений рассматриваемых планетезималей с Землей к вероятностям их столкновений с Луной было в основном в диапазоне от 16 до 17. Отношение массы вещества, доставленного на планету, к массе планеты для Марса было примерно в два-три раза больше, чем для Земли. Такие отношения для Меркурия и Венеры были не меньше, чем для Земли.

Работа выполнена в рамках госзадания ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН № 0137-2020-0004. Исследования миграции планетезималей из зоны питания Юпитера к Земле были поддержаны грантом Минобрнауки «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет».

#### Список литературы

- M. Y. Marov, A. V. Kolesnichenko, A. B. Makalkin, V. A. Dorofeeva, I. N. Ziglina, and A. V. Chernov, in E. M. Galimov, ed., *Problemy zarozhdenija i evolutsii biosfery. M.: "Librokom"*, 223–273 (2008).
- 2. M. Y. Marov, Kosmos. Ot Solnechnoy sistemy vglub Vselennoj. M.: Fizmatlit. 536 p. (2017).
- 3. M. Y. Marov and S. I. Ipatov, Solar System Research, 52, 392, 2018.
- 4. S. I. Ipatov and J. C. Mather, Advances in Space Research, 33, 1524, 2004.
- 5. S. I. Ipatov and J. C. Mather, Annals of the New York Academy of Sciences, 1017, 46, 2004.
- 6. S. I. Ipatov and J. C. Mather, Advances in Space Research, 37, 126, 2006.
- S. I. Ipatov, in J. A. Fernandez, D. Lazzaro, D. Prialnik, and R. Schulz, eds., *Icy Bodies of the Solar System*, *IAU Symposium*, volume 263, 41–44 (2010).
- 8. S. I. Ipatov, Earth Moon and Planets, **39**, 101, 1987.
- 9. S. I. Ipatov, Solar System Research, 27, 65, 1993.
- 10. S. I. Ipatov, Migratsija nebesnykh tel v Solnechnoj sisteme. M.: URSS. 320 pp. (2000).
- 11. H. F. Levison and M. J. Duncan, *Icarus*, **108**, 18, 1994.
- 12. M. Y. Marov and D. H. Grinspoon, The Planet Venus. New Haven: Yale University Press (1998).

# Выпадения планетезималей из разных частей зоны питания планет земной группы на формирующиеся планеты и зародыш Луны

## Ипатов С.И.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

Численно моделировалась эволюция орбит планетезималей в зоне питания планет земной группы. При этом учитывалось гравитационное влияние планет или их зародышей. Вероятности столкновений планетезималей с планетами или с их зародышами вычислялись на основе массивов элементов орбит мигрировавших планетезималей. Показано, что зародыши планет земной группы с массами, которые составляли не более 0.1 масс планет, аккумулировали в основном материал из окрестностей их орбит. Суммарная масса планетезималей из различных частей зоны от 0.7 до 1.5 а.е. от Солнца, столкнувшихся с почти сформировавшимися Землей и Венерой, отличалась для этих планет, вероятно, не более чем в два раза. Внутренние слои каждой земной планеты могли аккумулировать в основном планетезимали из окрестности орбиты этой планеты. Внешние слои Земли и Венеры могли аккумулировать в основном планетезимали из окрестности орбиты этой планеты. Внешние слои Земли и Венеры могли аккумулировать в аналогичные планетезимали из окрестности орбиты этой планеты. Внешние слои Земли и Венеры могли аккумулировать аналогичные планетезимали из окрестности орбиты этой планеты. Внешние слои Земли и Венеры могли аккумулировать с зародышей земли и Луны, равном 81 (отношению масс Земли и Луны), отношение вероятностей столкновений планетезималей с зародышами Земли и Луны не превышало 54. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

## Collisions of planetesimals from different parts of the feeding zone the terrestrial planets with the forming planets and the Moon embryo

## Ipatov S.I.

V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the RAS, Moscow, Russia

Computer simulations of the evolution of orbits of planetesimals were made for the feeding zone of the terrestrial planets. The gravitational influence of planets or their embryos was taken into account. The probabilities of collisions of planetesimals with planets or their embryos were calculated based on the orbital elements of migrated planetesimals. It was shown that the embryos of the terrestrial planets with masses which were not more than 0.1 of masses of the planets accumulated mainly material from neighbourhoods of their orbits. The amount of material from different parts of the zone from 0.7 to 1.5 AU from the Sun, which collided with almost formed the Earth and Venus, differed for these planets, probably, by no more than a factor of two. Inner layers of each terrestrial planets. At the ratio of the masses of the embryos of the feeding zone of the terrestrial planets. At the ratio of the masses of the embryos of the Earth and the Moon equaled to 81 (the ratio of the masses of the Earth and the Moon), the ratio of probabilities of collisions of planetesimals with the embryos of the Earth and the Moon in the considered calculations did not exceed 54. Based on a talk presented at the XI International Conference "Near-Earth Astronomy and Space Heritage" (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

**DOI:** 10.26087/INASAN.2020.5.3.004

## 1. Варианты расчетов

В отличие от проводившегося ранее моделирования эволюции дисков тел, объединявшихся при столкновениях [1, 2, 3, 4], при изучении аккумуляции планет земной группы ниже использовались данные других расчетов. Проведены расчеты миграции планетезималей из зоны питания планет земной группы, разделенной в зависимости от расстояния от Солнца на семь областей [5]. Учитывалось гравитационное влияние всех планет или их зародышей. При моделировании миграции тел использовался симплектический интегратор из пакета интегрирования Swift [6]. В ряде вариантов расчетов рассматривались все планеты. В других вариантах вместо планет земной группы рассматривались зародыши этих планет с массами, составлявшими 0.1 или 0.3 от современных масс планет. В случае зародышей планет земной группы с массами, меньшими в 10 раз современных масс планет, Уран и Нептун не рассматривались. Влияние газа не учитывалось. В каждом варианте расчетов рассматривалось 250 планетезималей с начальными значениями а<sub>0</sub> больших полуосей планетезималей от  $a_{\min}$  до  $a_{\min} + 2.5$  а.е.. Число начальных планетезималей было пропорционально  $a_0^{1/2}$ . Проведены расчеты миграции планетезималей из зоны (от 0.3 до 2 а.е.), разделенной на семь областей (0.3-0.5, 0.5-0.7, 0.7-0.9, 0.9-1.1, 1.1-1.3, 1.3-1.5 и 1.5-2 а.е.). Для каждой области проводились отдельные расчеты. Ранее (например, в [2, 3]) рассматривалась эволюция дисков тел, объединяющихся при столкновениях, более широкие области и только доли тел, пришедших из разных областей, в уже образовавшихся планетах (а не на разных стадиях их роста). Начальные эксцентриситеты е0 орбит планетезималей равнялись 0.05 или 0.3. Начальные наклонения орбит планетезималей приняты равными  $e_0/2$  рад. Средние эксцентриситеты, равные 0.3, могли быть достигнуты вследствие гравитационного влияния планетезималей и зародышей планет при эволюции диска планетезималей в зоне питания земной группы [1, 2, 3].

Столкновения планетезималей с планетами не моделировались. Полученные при расчетах массивы элементов орбит мигрировавших планетезималей в ходе их динамических времен жизни использовались при вычислении вероятностей их столкновений с планетами, с Луной, или с их зародышами. Элементы орбит планетезималей записывались с шагом в 500 лет. Расчеты этих вероятностей проводились аналогично расчетам в [5, 7, 8, 9, 10]. Значения вероятности столкновения за некоторый интервал времени равный 500 годам суммировались по всему динамическому времени жизни планетезимали. По сравнению с моделированием эволюции дисков тел, объединяющихся при столкновениях, такой подход позволяет получить большую статистику вероятностей столкновений за некоторые интервалы времени, в частности, он позволяет оценивать вероятности столкновений за некоторые интервалы времени, а не за все время эволюции диска. Массы планетезималей при расчетах считались нулевыми, но на основе полученных вероятностей столкновений планетезималей с зародышами делались оценки роста зародышей планет. При этих оценках суммарная масса вещества в зоне питания планет земной группы немного превышала современную массу планет земной группы. Из-за неучитываемого взаимного гравитационного влияния планетезималей, модельные расчеты показывают минимальную оценку перемешивания вещества.

#### 2. Аккумуляция планет земной группы

На основании проведенных расчетов сделаны выводы о процессе аккумуляции планет земной группы. Зародыши планет земной группы, массы которых не превышали одной десятой от масс современных планет, аккумулировали в основном планетезимали из окрестностей своих орбит. Внутренние слои планеты земной группы формировались в основном из вещества из окрестности орбиты этой планеты. При выпадении планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна на зародыши планет земной группы эти зародыши еще не приобрели современных масс планет, и материал (в том числе вода и летучие) из этой зоны мог аккумулироваться во внутренние слои планет земной группы и Луны. Вероятности выпадений планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от 0.7 до 0.9 а.е. от Солнца, на зародыши Земли и Венеры с массами, равными 0.3 от масс современных планет, отличались для этих зародышей не более, чем в два раза (на Венеру выпадало немного больше этих планетезималей). Суммарная масса планетезималей, первоначально находившихся в каждой из областей зоны, расположенной на расстоянии от 0.7 до 1.5 а.е. от Солнца, и столкнувшихся с почти сформировавшимися Землей и Венерой, отличалась для этих планет, вероятно, не более чем в 2 раза. Внутренние слои каждой планеты земной группы формировались в основном из вещества из окрестности орбиты этой планеты. Внешние слои Земли и Венеры могли аккумулировать одинаковый для этих двух планет материал из различных частей зоны питания планет земной группы.

В рассмотренной модели, в которой тела объединялись с планетами при любых столкновениях, Земля и Венера могли приобрести значительную часть (более половины) своей массы за 5 млн. лет. В частности, за это время большинство планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от 0.7 до 1.1 а.е. от Солнца, выпадали на растущие Землю и Венеру. Учет выброса вещества при столкновениях планетезималей с планетами может увеличить время аккумуляции планет. При малой массе зародыша Марса этот зародыш рос медленно. Предположение о формировании зародыша Марса с массой, в несколько раз меньшей массы Марса, в результате сжатия разреженного сгущения может объяснить относительно быстрый рост (не более 10 млн. лет) основной массы Марса, который следует из изучения отношения Hf/W для марсианской мантии (например, [11, 12]) и из соотношения  $^{207}$ Pb/ $^{206}$ Pb изотопов свинца в марсианском метеорите [13]. Элкинс-Тантон [14] полагает, что Марс вырос до примерно современных размеров, вероятно, за менее, чем 5 млн. лет, после образования CAI (кальций-алюминиевых включений). На основании проведенных расчетов можно также предположить формирование зародыша Меркурия с массой около 0.02 от массы Земли при сжатии сгущения [5].

Доля планетезималей, выпавших на Солнце, могла превышать 10% для начальных расстояний планетезималей от Солнца в диапазонах от 0.3 до 0.5 а.е. и от 1.1 до 2.0 а.е. Доля планетезималей, выброшенных из зоны питания планет земной группы на гиперболические орбиты, не превышала 10%. Вероятность столкновения планетезимали, первоначально находившейся в зоне питания планет земной группы, с Юпитером составляла не более нескольких процентов от вероятности ее столкновения с Землей, а вероятности столкновений планетезималей с Сатурном были в среднем на порядок меньше, чем с Юпитером. Приведенные выше оценки формирования зародышей планет земной группы основывались на расчетах для модели, учитывающей гравитационное влияние планет-гигантов и зародышей планет земной группы. Учет взаимного гравитационного влияния планетезималей может увеличить перемешивание вещества в зоне питания планет земной группы, а также вероятность столкновений планетезималей с Солнцем и их выброс на гиперболические орбиты.

При отношении масс зародышей Земли и Луны, равном 81 (отношению масс Земли и Луны), отношение вероятностей выпадений планетезималей на зародыши Земли и Луны в рассмотренных вариантах не превышало 54 и было максимально при массах зародышей примерно в три раза меньших современных масс этих небесных тел. Особенности формирования планет земной группы можно объяснить даже при относительно плавном уменьшении большой полуоси орбиты Юпитера за счет выброса им планетезималей на гиперболические орбиты, без рассмотрения миграции Юпитера к орбите Марса и обратно («модель большого поворота», Grand Tack model) и без резких изменений орбит планет-гигантов, попадавших в резонанс, в модели Ниццы (Nice model). В последние годы формирование планет земной группы рассматривалось в основном в рамках этих двух моделей.

## 4. Заключение

Зародыши планет земной группы, массы которых были порядка одной десятой от масс современных планет или меньше, аккумулировали в основном планетезимали из окрестностей своих орбит. Внутренние слои планеты земной группы формировались в основном из вещества из окрестности орбиты этой планеты. При выпадении планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна на зародыши планет земной группы эти зародыши еще не приобрели масс современных планет и материал (в том числе вода и летучие) из этой зоны мог попадать во внутренние слои планет земной группы и влиять на их состав. При массах зародышей Земли и Венеры порядка трети масс современных планет вероятности выпадений планетезималей, сформировавшихся на расстоянии от 0.7 до 0.9 а.е. от Солнца, на эти зародыши отличались не более, чем вдвое. В рассмотренной модели, в которой планетезимали объединялись с планетами при любых столкновениях, Земля и Венера могли приобрести значительную часть (более половины) своей массы за 5 млн. лет. В частности, за это время большинство планетезималей, первоначально находившихся на расстоянии от 0.7 до 1.1 а.е. от Солнца, выпадали на растущие Землю и Венеру. Учет выброса вещества при столкновениях тел с планетами может увеличить время аккумуляции планет.

Работа выполнена в рамках госзадания ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН № 0137-2020-0004. Исследования роста зародыша Земли были поддержаны грантом Минобрнауки «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет».

### Список литературы

- 1. S. I. Ipatov, Earth Moon and Planets, 39, 101, 1987.
- 2. S. I. Ipatov, Solar System Research, 27, 65, 1993.
- 3. S. I. Ipatov, Migratsija nebesnykh tel v Solnechnoj sisteme. M.: URSS. 320 pp. (2000).
- 4. J. E. Chambers, *Icarus*, **224**, 43, 2013.
- 5. S. I. Ipatov, Solar System Research, 53, 332, 2019.
- 6. H. F. Levison and M. J. Duncan, *Icarus*, 108, 18, 1994.
- 7. S. I. Ipatov and J. C. Mather, Earth Moon and Planets, 92, 89, 2003.
- 8. S. I. Ipatov and J. C. Mather, Annals of the New York Academy of Sciences, 1017, 46, 2004.
- 9. S. I. Ipatov and J. C. Mather, Advances in Space Research, 33, 1524, 2004.
- 10. S. I. Ipatov and J. C. Mather, Advances in Space Research, 37, 126, 2006.
- 11. K. Mezger, V. Debaille, and T. Kleine, Space Sci. Rev., 174, 27, 2013.
- 12. F. Nimmo and T. Kleine, *Icarus*, **191**, 497, 2007.
- 13. L. C. Bouvier, M. M. Costa, J. N. Connelly, N. K. Jensen, et al., Nature, 558, 568, 2018.
- 14. L. T. Elkins-Tanton, Nature, 558, 522, 2018.

# Оценки изменения численности околоземных объектов на основе возрастов лунных кратеров в течение последнего миллиарда лет

Ипатов С.И.<sup>1</sup>, Феоктистова Е.А.<sup>2</sup>, Светцов В.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

Показано, что характерный размер лунного кратера, образующегося при выпадении на Луну 1-км тела, составляет около 15 км. Сделаны оценки числа кратеров с диаметрами не менее 15 км, которые могли образоваться за 1.1 млрд. лет, если бы число объектов, пересекающих орбиту Земли (ОПОЗ), и элементы их орбит за это время равнялись их современным значениям. При вероятности столкновения ОПОЗ с Луной близкой к  $5 \cdot 10^{-10}$  для всей поверхности Луны эти оценки числа кратеров в 5–6 раз превышают число кратеров с диаметром  $D \ge 15$  км, возраст которых оценивается в работах в работах Магсоцеі и др. и Losiak и др. меньше 1.1 млрд. лет. На основании данных этих работ, показано, что число кратеров с  $D \ge 15$  км и с возрастом не более 1.1 млрд. лет на единицу поверхности Луны для области в районе Океана Бурь (Oceanus Procellarum) и морей видимой стороны Луны в 1.75–3.5 раза больше, чем для всей поверхности Луны. Причинами большего числа кратеров на единицу поверхности для лунных морей, чем для всей поверхности Луны. Причинами большего числа кратеров на единицу поверхности для лунных морей, чем для всей поверхности Луны. Причинами большего числа кратеров на единицу поверхности для лунных морей, чем для всей поверхности Луны. Причинами большего числа кратеров на единицу поверхности для лунных морей, чем для материков, могут быть, например, различные подстилающие поверхности для морей и материков и неточности определения возраста кратеров. Полученные нами оценки темпа кратерообразования не противоречат возможности увеличения темпа кратеробразования в 2.6 раза 290 млн. лет назад, рассмотренной в работе Магсоцеі и др., но и не доказывают эту возможность. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

## Estimates of variations in the number of near-Earth objects based on the ages of lunar craters over the past billion years

## Ipatov S.I.<sup>1</sup>, Feoktistova E.A.<sup>2</sup>, Svetsov V.V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the RAS, Moscow, Russia, siipatov@hotmail.com <sup>2</sup>P.K. Sternberg State Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia <sup>3</sup>Institute of Dynamics of Geospheres of the RAS, Moscow, Russia

It is shown that the characteristic size of the lunar crater, formed as a result of a collision of a 1-km body with the Moon, is about 15 km. We estimated the number of craters with diameters of at least 15 km, that could have formed during 1.1 billion years if the number of Earth-crossing objects (ECOs) and their orbital elements during this time were equal to their present values. With the probability of collisions of ECOs with the Moon close to  $5 \cdot 10^{-10}$  for the entire surface of the Moon, our estimates are 5–6 times higher than the number of craters with a diameter  $D \ge 15$  km, whose ages were estimated in the papers by Mazrouei et al. and Losiak et al. to be less than 1.1 billion years. Based on the data of these papers, it was shown that the number of craters with  $D \ge 15$  km and with an age of not more than 1.1 billion years per unit of lunar surface for the region of the Ocean of Storms (Oceanus Procellarum) and the seas of the visible side of the Moon are 1.75–3.5 times greater than for the entire surface of the Moon. The reasons for the greater number of craters per unit of surface for lunar seas than for continents may be, for example, explained by various underlying surfaces for the seas and continents and by inaccuracies in calculating the ages of craters. Our estimates of the rate of crater formation do not contradict to the possibility of increasing the rate of crater formation by a factor of 2.6 290 million years ago, considered in the paper by Mazrouei et al., but they do not prove this possibility. Based on a talk presented at the XI International Conference "Near-Earth Astronomy and Space Heritage" (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

**DOI:** 10.26087/INASAN.2020.5.3.005

## 1. Введение

Оценки возраста кратеров в [1] были основаны на использовании радиометра Diviner зонда LRO (на анализе теплофизических характеристик материала, выбрасываемого при ударах). Анализируя возрасты кратеров коперниковского периода (то есть кратеров с возрастом менее 1.1 млрд. лет), авторы работы [1] пришли к выводу, что число столкновений объектов, сближающихся с Землей (ОСЗ), с Луной за единицу времени увеличилось в 2.6 раза 290 млн. лет назад. Предположение об увеличении количества кратеров, образованных за единицу времени, в 2 раза за последние 300 млн. лет было сделано ранее в [2] на основе изучения ярких лучей в кратерах. Согласно [3], катастрофическое разрушение большого астероида главного пояса 160 млн. лет назад могло увеличить современное число объектов, сближающихся с Землей (ОСЗ), с диаметром d > 1 км по сравнению со средним числом, полученным для интервала в 1 млрд. лет.

## 2. Вероятности столкновений ОСЗ с Луной

В настоящей работе рассматривается возможное изменение потока кратерообразующих тел в течение последнего млрд. лет и обсуждается возможность увеличения этого потока в течение последних 300 млн. лет. Эти оценки используют данные о диаметрах лунных кратеров с возрастом не более 1.1 млрд. лет, данные о числе объектов, сближающихся с Землей, оценки вероятностей столкновений околоземных объектов с Луной и зависимости диаметров кратеров от диаметров ударников. В отличие от [4], в данной работе мы используем другие данные о возрасте кратеров. Отношение вероятностей столкновений ОСЗ с Землей к вероятностям их столкновений с Луной считалось равным примерно 22 [5]. Оценки вероятностей столкновений объектов, пересекающих орбиту Земли (ОПОЗ), с Землей основывались на подходе, описанном в [6, 7, 8]. В [6, 7] характерное время  $T_{\rm E}$ , прошедшее до столкновения ОПОЗ с Землей, составило около 67 млн. лет. При этих оценках  $T_{\rm E}$  рассматривались 756 известных в то время ОПОЗ. Используя подход Эпика, авторы [9] получили  $T_{\rm E} = 134$  млн. лет для меньшего числа ОПОЗ. В [10] вероятности столкновений тел с Землей, полученные с помощью подхода Эпика, были только в 1.08 раза больше, чем вероятности, полученные при численном интегрировании. При  $T_{\rm E} = 100$  млн. лет вероятность столкновения ОПОЗ с Землей в течение года составляет  $10^{-8}$ .

На рис. 26 из работы [11] приведена кривая зависимости числа столкновений за год с Землей тел с абсолютной звездной величиной, меньшей H, от H. H = 17.75 соответствует ОСЗ с диаметром около 1 км. При H около 25–26 точки на этой кривой соответствуют значениям вероятности, в несколько раз (почти на порядок) меньшим приведенных на этом же рисунке значений вероятности выпадения на Землю объекта типа Тунгусского объекта, а также вероятностей выпадения болидов, взятых из [12]. На рис. 26 из работы [11] экстраполяция кривой вероятности столкновения с Землей объектов с  $17 \le H \le 25$  до данных о наблюдаемых болидах с  $H \ge 26$  согласуется с данными [13], но не согласуется с данными более поздней работы [12]. Для согласования с данными [12] и с вероятностями выпадения на Землю объектов типа Тунгусского явления, кривая вероятности столкновения с Землей при  $17 \le H \le 25$  должна лежать гораздо выше кривой, приведенной на рис. 26 работы [11], и такая более высокая кривая лучше согласуется с используемыми нами данными о том, что вероятность столкновения ОПОЗ с Землей за год близка к  $10^{-8}$  (то есть вероятность столкновения С Землей объектов та согласуется с листользуемыми нами данными о том, что вероятность столкновения ОПОЗ с Землей за год близка к  $10^{-8}$  (то есть вероятность столкновения с Землей опо 3 с Землей за год близка к  $10^{-8}$  (то есть вероятность столкновения с Землей за год близка к  $10^{-8}$  (то есть вероятность столкновения с Землей за год близка к  $10^{-8}$  (то есть вероятность столкновения с Землей за год близка к  $10^{-8}$  (то есть вероятность столкновения с Землей за год близка к  $10^{-8}$  (то есть вероятность столкновения с Землей за год близка к  $10^{-8}$  (то есть вероятность столкновения с Землей за год близка к  $10^{-8}$  (то есть вероятность столкновения с Землей за год близка к  $10^{-8}$  (то есть вероятность столкновения с Землей за год близка к  $10^{-8}$  (то есть вероятность столкновения с Землей за год близка к  $10^{-8}$  с за вероятность столкновения с Землей за год близка к  $10^{-8}$ 

## 3. Сравнение числа известных кратеров с возрастом менее 1.1 млрд. лет с оценками для рассматриваемой модели

В [4] мы показали, что характерный диаметр кратера, образовавшегося после столкновения ОСЗ с диаметром, равным 1 км, с Луной, составляет около 15 км. В [4] число известных кратеров с возрастом менее 1.1 млрд. лет оценивалось на основе базы данных [14], и, кроме того, рассматривались кратеры с неподтвержденным возрастом первой (т. е. наилучшей) степени сохранности из морфологического каталога лунных кратеров, сделанного в ГАИШ. Из этих кратеров с неподтвержденным возрастом только один был включен в таблицу, приведенную в [1]. Поэтому здесь мы не рассматривали такие кратеры. Для новых оценок числа кратеров мы использовали каталог лунных кратеров [14], а также данные из [1]. Мы использовали данные о количестве кратеров различных размеров, как для всей поверхности Луны, так и отдельно для области Океана Бурь и морей видимой стороны Луны. По данным [14], 53 лунных кратера с диаметром не менее 15 км относятся к Коперниковскому периоду, 29 из них расположены в области морей видимой стороны Луны. Согласно данным из сопроводительных материалов к [1], число таких кратеров для почти полной лунной поверхности и для области морей равно 44 и 12 соответственно. При одинаковом количестве кратеров на единицу площади для всей поверхности Луны и для морей приведенные выше оценки числа кратеров для района Океана Бурь и морей видимой стороны, равные 29 и 12, соответствуют числу N<sub>obs</sub> кратеров на всей поверхности Луны, равному 187 и 77 соответственно. Приведенные выше данные работ [1] и [14] показывают, что число коперниканских кратеров с диаметром не менее 15 км на единицу площади для морей больше, чем для всей поверхности Луны, в  $187/53 \approx 3.5$  и  $77/44 \approx 1.75$  раз, соответственно. Эти отличия могут быть связаны, в частности, с различием подстилающей поверхности на морях и материках и с неточностью определения возраста кратеров.

Для всей поверхности Луны число кратеров с диаметром не менее 15 км, относящихся к Коперниковскому периоду, составляет 44 и 53 для [1] и [14], соответственно. Эти числа в 6.1 и 5.0 раз меньше, чем значения  $N_{\rm est} = 267$  числа кратеров, полученные для нашей модели при  $T_{\rm E} = 100$  млн. лет.  $N_{\rm est} = 267$  также превышает число кратеров на Луне (77 и 187 для [1] и [14], соответственно), если их количество на единицу площади такое же, как и для рассматриваемой области морей.

Основной результат работы [1] состоит в том, что вероятность столкновений ОСЗ с Луной увеличилась в 2.6 раза 290 млн. лет назад. Для модели, в которой вероятность столкновения ОСЗ с Луной была равна современному значению вероятности за последние 290 млн. лет, а до этого в течение 810 млн. лет она была в 2.6 раза меньше современного значения, число образовавшихся кратеров составляет 0.6 от оценки, полученной на основе современного числа ОСЗ (т.е. будет в 1.7 раза меньше этой оценки). Приведенные выше оценки увеличения вероятности столкновений ОСЗ с Луной в 2.6 раз 290 млн. лет назад лучше согласуются с оценками  $N_{\rm est}$  числа кратеров, полученными для нашей модели при  $T_{\rm E} = 300$  млн. лет и при рассмотрении числа кратеров на единице поверхности, как для всей поверхности Луны. Для всей поверхности Луны число коперниканских кратеров с диаметром  $D \ge 15$  км, полученное при вероятности столкновения ОПОЗ с Землей за год, равной  $10^{-8}$ , находится в лучшем соответствии с данными о кратерообразовании, приведенными в [15], чем в [1, 14], но больше, чем в этих трех работах. При сравнении с данными [1, 14] наши оценки лучше соответствуют числу известных кратеров коперниковского периода с  $D \ge 15$  км на единице площади для области в районе Океана Бурь и морей видимой стороны Луны, чем для всей поверхности Луны. Наши оценки числа кратеров соответствуют модели, в которой число коперниканских кратеров на единице площади для всей поверхности Луны было бы таким же, как и для области морей, если бы данные [14] для D < 30 км были бы такими же полными, как и для D > 30 км. Для такой модели темп кратерообразования за последний 1.1 млрд. лет мог быть постоянным. Можно предположить, что количество кратеров с возрастом не более 1.1 млрд. лет на единице площади для всей поверхности Луны может быть примерно таким же, как и для области морей, то есть больше, чем современная оценка для всей поверхности Луны.

### 4. Заключение

Проведено сравнение количества лунных кратеров с диаметром большим 15 км и с возрастом, не превышающим 1.1 млрд. лет, с оценками числа кратеров, которые могли образоваться за 1.1 млрд. лет, если бы число околоземных объектов с диаметром большим 1 км и элементы их орбит за это время были близки к их современным значениям. Сравнение проводилось для кратеров на всей поверхности Луны и для области в районе Океана Бурь (Oceanus Procellarum) и морей видимой стороны Луны. При этих оценках использовались значения вероятностей столкновений околоземных объектов с Луной и зависимости диаметров кратеров от диаметров ударников, породивших эти кратеры. Получено, что число известных кратеров на единице поверхности больше в 1.75–3.5 раз для области лунных морей, чем для всей поверхности Луны. Число кратеров с возрастом не более 1.1 млрд. лет для всей поверхности Луны может быть больше, чем по современным оценкам возраста кратеров. Наши оценки не противоречат выводу работы [1] о том, что число столкновений околоземных астероидов с Луной за единицу времени возросло в 2.6 раза 290 млн. лет назад, но и не доказывают этот вывод.

Работа выполнена в рамках госзаданий ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН № 0137-2020-0004, ГАИШ МГУ и ИДГ РАН. Исследования различных подходов к вычислению вероятностей столкновений тел с планетой были поддержаны грантом Минобрнауки «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет».

#### Список литературы

- 1. S. Mazrouei, R. R. Ghent, W. F. Bottke, A. H. Parker, and T. M. Gernon, Science, 363, 253, 2019.
- 2. A. S. McEwen, J. M. Moore, and E. M. Shoemaker, JGR, 102, 9231, 1997.
- 3. W. F. Bottke, D. Vokrouhlický, and D. Nesvorný, Nature, 449, 48, 2007.
- S. I. Ipatov, E. A. Feoktistova, and V. V. Svetsov, in L. M. Zelenyi, ed., The Ninth Moscow Solar System Symposium 9M-S3, M-S3 Symposium, https://ms2018.cosmos.ru/, volume 1, 349–351 (2018).
- 5. M. Le Feuvre and M. A. Wieczorek, *Icarus*, **214**, 1, 2011.
- 6. S. I. Ipatov and J. C. Mather, Annals of the New York Academy of Sciences, 1017, 46, 2004.
- 7. S. I. Ipatov and J. C. Mather, Advances in Space Research, 33, 1524, 2004.
- 8. S. I. Ipatov, Solar System Research, 53, 332, 2019.
- J. Bottke, W. F., M. C. Nolan, R. Greenberg, and R. A. Kolvoord, in T. Gehrels, ed., Hazards Due to Comets and Asteroids, 337–357 (1994).
- 10. P. Pokorný and D. Vokrouhlický, Icarus, 226, 682, 2013.
- 11. M. Granvik, A. Morbidelli, R. Jedicke, B. Bolin, et al., *Icarus*, **312**, 181, 2018.
- 12. P. G. Brown, J. D. Assink, L. Astiz, R. Blaauw, et al., Nature, 503, 238, 2013.
- 13. P. Brown, R. E. Spalding, D. O. ReVelle, E. Tagliaferri, and S. P. Worden, Nature, 420, 294, 2002.
- A. Losiak, T. Kohout, K. O'Sulllivan, K. Thaisen, and S. Weider, in *Lunar and Planetary Institute*, Lunar exploration Intern Program. 2009. Updated by T. Ohman. 2015 (2015).
- 15. S. C. Werner and B. Ivanov, in Treatise on Geophysics (Second Edition), volume 10, 327–365 (2015).

## Современная звездная астрономия

Малков О.Ю.<sup>1</sup>, Поляченко Е.В.<sup>1</sup>, Расторгуев А.С.<sup>2,3</sup>, Самусь Н.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия <sup>3</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

Здесь представлен аналитический обзор современного состояния проблем звездной астрономии. Он преимущественно базируется на докладах, сделанных на девятой ежегодной конференции «Современная звездная астрономия» (ГАИШ МГУ / ИНАСАН). Обзор разбит на темы: «Звезды», «Звездные скопления и ассоциации», «Строение, кинематика и динамика Галактики», «Галактики», «Звездообразование», «Динамика гравитирующих систем», «Научные задачи проекта «Лира-Б».

## Modern stellar astronomy

Malkov O.Yu.<sup>1</sup>, Polyachenko E.V.<sup>1</sup>, Rastorguev A.S.<sup>2,3</sup>, Samus N.N.<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

<sup>3</sup>MSU, Physics Faculty, Moscow, Russia

We provide an analytic review of problems of the modern stellar astronomy. It mostly based on talks presented at the ninth annual conference on Modern Stellar Astronomy, held in Sternberg Astronomical Institute MSU and Institute of Astronomy RAS (Moscow, Russia). The key topics for the review are Stars, Stellar clusters and associations, Structure, kinematics and dynamics of Milky Way Galaxy, Galaxies, Star formation, Dynamics of gravitating systems, Space project "Lyra-B" scientific tasks.

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.3.006

#### 1. Введение

В данной работе представлен аналитический обзор современных задач, стоящих перед звездной астрономией. Он создан, преимущественно, по материалам докладов, представленных на девятой конференции из цикла «Современная звездная астрономия». Она была проведена 23–26 октября 2018 г. в ГАИШ МГУ и ИНАСАН (Москва). Помимо ГАИШ МГУ и ИНАСАН, организаторами конференции выступили ИЗМИРАН и Астрономическое общество. Сайт конференции: http://www.sai.msu.su/EAAS/rus/confs/EAAS XIII/s1.html.

Обзор разбит на семь разделов: «Звезды», «Звездные скопления и ассоциации», «Строение, кинематика и динамика Галактики», «Галактики», «Звездообразование», «Динамика гравитирующих систем», «Научные задачи проекта «Лира-Б». В разделе 9 приведены заключительные замечания.

## 2. Звезды

Н.И. Бондарь (Крымская астрофизическая обсерватория РАН) в докладе «Особенности циклической активности у быстро вращающихся G-M карликов» рассмотрела, как модифицируется общая для звезд солнечного типа зависимость, согласно которой длительность цикла активности оказывается больше для звезд с более медленным осевым вращением, в случае наиболее быстро вращающихся звезд. Единой зависимости не найдено. Вероятно, для звезд с периодами осевого вращения менее 5 суток зависимость может быть выявлена раздельно для звезд классов G, K, M при условии анализа более обширной выборки.

О.М. Белова (физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова) представила доклад «Особенности высвечивания ударных волн в атмосферах холодных звезд». На основе нового алгоритма расчета высвечивания газа за фронтом ударной волны в рамках модели двухтемпературного газа удалось объяснить большой наблюдаемый диапазон отношений потоков в линиях  $H_{\delta}$  и  $H_{\gamma}$  в спектрах переменных типа Миры Кита. Это отношение может служить критерием плотности газа перед фронтом ударной волны. Теоретические потоки в спектральных линиях водорода и в континууме для условий в хромосфере красного карлика согласуются с наблюдаемым излучением вспышек

Коллектив авторов из Одессы (А.А. Горбунов, М.И. Рябов, А.Л. Сухарев, В.В. Безруков) выступил с докладом «Перспективы программы синхронных наблюдений изменений потока остатка сверхновой Кассиопея А в радиодиапазоне». Для объекта Cas A накоплен обширный наблюдательный материал по вековому изменению радиопотока в широком диапазоне длин волн за 1962–2018 гг. Выявлено наличие систематических трендов изменения потока на различных длинах волн. Предложена международная программа квазиодновременных наблюдений на радиотелескопах Латвии и Украины с перспективой подключения к ней российских радиотелескопов. С.Ю. Горда (Коуровская астрономическая обсерватория Уральского федерального университета) в докладе «Возможная цикличность пятенной активности AM Leo» проанализировал полученный им длительный (2007–2017 гг.) цикл фотометрического мониторинга AM Leo, короткопериодической контактной затменной системы типа W UMa. Кривая блеска звезды испытывает постоянные изменения, вероятно, связанные с пятенной активностью. Возможно наличие цикла активности длиной 7.5 лет.

А.К. Дамбис, Л.Н. Бердников, В.М. Липунов, Н.В. Тюрина, Е.С. Горбовской (ГАИШ МГУ) в докладе «Поиск и исследование периодических переменных звезд вблизи Северного полюса неба ( $\delta > 60^{\circ}$ ) по данным обзора MACTEP» представили результаты поиска и классификации периодических переменных звезд, в том числе переменных типа RR Lyr, на основе примерно 1.5 млрд. измерений блеска 7 млн. звезд с фотометрической калибровкой по результатам обзора Gaia DR2. Эта область неба практически не была охвачена проектами Catalina и SuperWASP. Для обнаруженных новых переменных типа RR Lyr оценены металличности и расстояния.

Е.С. Дмитриенко (ГАИШ МГУ) и И.С. Саванов (ИНАСАН) доложили об исследовании активности молодых холодных карликов с планетами по данным космического телескопа Кеплер. Программа исследования включала системы K2-231, EPIC 219388192, K2-136, Kepler-66 и Kepler-67. Прослежена непрерывная эволюция активных областей на их поверхности в течение 70 суток. Найдены или уточнены периоды вращения звезд. Построены карты температурных неоднородностей на поверхности звезд. Выявленные зависимости между площадью запятненной поверхности звезд и их возрастом, периодами вращения и числами Россби, согласуются с общим характером таких зависимостей, ранее установленных авторами для 1570 М-карликов, а также выявленных в ходе представленного исследования для 34030 звезд.

Астрономы из ИНАСАН М.Е. Сачков, Е.Н. Канев и С.Г. Сичевский представили доклад «Ультрафиолетовые кривые блеска радиально пульсирующих звезд». Это исследование является частью подготовки научной программы международного проекта «Спектр-УФ».

И.С. Саванов, В.Б. Пузин (ИНАСАН) и Е.С. Дмитриенко (ГАИШ МГУ) выступили с докладом «Переменность блеска ROTD А-звезд». Построенные по фотометрическим наблюдениям спектры мощности этих звезд содержат доминирующий по амплитуде узкий пик на частоте F1(phot), а наиболее низких частотах широкий пик, как правило, состоящий из многочисленных деталей. Получены указания на достаточно быструю эволюцию образований на поверхности звезд типа ROTD за время порядка продолжительности сета наблюдений (90 суток). Наблюдения подтверждают значительный рост параметра дифференциального вращения у звезд с температурой выше 6700 К.

Г.Н. Дремова и В.В. Дремов из Российского Федерального Ядерного Центра (Снежинск) выступили с докладом о роли эффекта Росситера-Маклаффлина в изучении тесных двойных систем. Эффект известен почти 95 лет. При измерении эффекта вращательной аномалии большой проблемой является освобождение от света звезд, находящихся впереди затмеваемой звезды, что способствовало негласному распространению «стандарта компланарности». На примере затменных переменных звезд AI Hya, NY Cep, EW Ori, DI Her, AS Cam, демонстрирующих аномальный апсидальный эффект, авторы рассчитали спектр решений уравнения апсидального движения в зависимости от орбитальных наклонений, выбрав пары углов, обеспечивающие согласие между наблюдаемым и теоретическим апсидальным периодом.

Г.Н. Дремова, В.В. Дремов (Снежинск) и А.В. Тутуков (ИНАСАН) представили доклад «Оценка времени разрушения звезд, захваченных в окрестность сверхмассивной черной дыры, в сценарии Хиллза». Сценарий Хиллза, рассматривающий динамический захват компонента двойной системы окрестностью сверхмассивной черной дыры, объясняет рождение сверхскоростных звезд в результате выброса другого звездного компонента за счет перераспределения момента импульса. Популяции сверхскоростных звезд и звезд, захваченных в галактическом центре, строго скоррелированы, поскольку пополняются за счет одного и того же механизма. Представляет интерес сравнение расчетной популяции захваченных компаньонов сверхскоростных звезд с наблюдаемой статистикой захваченных звезд в галактическом центре.

Большая группа авторов из ГАИШ МГУ (А.А. Татарникова, Е.А. Колотилов, Н.В. Метлова, Т.Н. Тарасова, А.М. Татарников, В.И. Шенаврин) подвели итоги сорока лет наблюдений симбиотической новой PU Vul на Крымской астрономической станции ГАИШ. Вспышка была открыта в апреле 1979 г. В этом же году ее начали наблюдать на телескопах Крымской станции ГАИШ. Горячий компонент двойной звезды эволюционировал от горячего сверхгиганта спектрального класса A-F через стадию, напоминающую звезду Вольфа-Райе, к горячему субкарлику с  $T_{\rm eff} \sim 100000$  К и светимостью  $10000L_{\odot}$ . При орбитальном периоде в ~ 13.4 года система является затменной. Наблюдалось всего 3 затменных минимума, форма которых радикально менялась. В настоящее время на фоне плавных изменений блеска амплитудой 1<sup>m</sup>, связанных с частичным затмением туманности холодным компонентом, наблюдаются вариации блеска, связанные с пульсациями холодного компонента с P = 217.7 сут.

П.Б. Иванов (ФИАН) рассмотрел динамику искривленного аккреционного диска, образовавшегося после приливного разрушения звезды вращающейся черной дырой. Момент гравитомагнитной силы вызывает тенденцию к укладке диска в экваториальную плоскость, тогда как момент сил, связанный со струей газа, возникшей после приливного разрушения — к укладке в орбитальную плоскость звезды. Показано, что диск эволюционирует в разных режимах на достаточно ранних и поздних временах. Сначала внутренняя область диска имеет приблизительно независящий от радиуса угол наклона, который, однако, не остается неизменным из-за действия момента сил газовой струи. В дальнейшем диск эволюционирует квазистационарным образом. В случае достаточно малого значения параметра вязкости Шакуры-Сюняева на внешней границе этой области развивается специфическая неустойчивость, связанная с накоплением там изгибных волн, которая приводит к резкому росту угла наклона вблизи границы.

Н.Н. Иконникова, В.П. Архипова, В.И. Шенаврин, Г.В. Комиссарова, В.Ф. Есипов, М.А. Бурлак (ГАИШ МГУ) представили доклад «Об эволюционном статусе желтого сверхгиганта с пылевой оболочкой V1427 Орла». Исследование проводилось в 1990–2018 гг. на основе фотометрии в видимом и инфракрасном диапазоне, а также оптических спектральных наблюдений низкого разрешения. V1427 Aql, скорее всего, является массивным желтым гипергигантом на стадии post-RSG.

О.Ю. Малков, Д.А. Ковалева и П.В. Кайгородов (ИНАСАН) в докладе «База данных двойных звезд BDB: новые возможности и приложения» представили обзор основных функций BDB, рассказали о новых возможностях и перспективах ее развития. BDB включает в себя информацию из нескольких десятков оригинальных каталогов. Проведена кросс-идентификация включенных в BDB объектов и создана система идентификации BSDB, позволяющая однозначно идентифицировать системы, пары и компоненты пар. Поиск объектов в BDB возможен как по идентификатору (поддерживаются все основные системы идентификации), так и по параметрам [1].

Доклад Д.А. Ковалевой, О.Ю. Малкова, А.Ю. Сытова, А.В. Тутукова, Д.А. Чулкова, Л.Р. Юнгельсона (ИНАСАН) был посвящен моделированию ансамбля двойных звезд Галактики. Исследование статистических характеристик этой популяции необходимо для понимания характеристик процесса звездообразования. Данные второго релиза обзора Gaia позволяют надеяться на существенное продвижение в отношении выделения двойных звезд в скоплениях. Авторы исследуют подходы к выяснению текущих и восстановлению начальных характеристик популяции двойных звезд путем решения обратной задачи — моделирования эволюции синтетических популяций с различными начальными свойствами. Были представлены результаты моделирования для нескольких выборок двойных звезд с различными свойствами, обсуждались возможности и ограничения разработанной методики.

Е.А. Карицкая (ИНАСАН), Н.Г. Бочкарев, В.П. Горанский и Н.В. Метлова (ГАИШ МГУ) выступили с докладом «Долговременная переменность рентгеновской двойной Лебедь Х-1». Ведущееся на протяжении 44 лет исследование спектральной и фотометрической долговременной переменности V1357 Cyg = Cyg X-1 позволяет делать выводы об изменениях фундаментальных параметров сверхгиганта в этой системе на временной шкале «годы — десятки лет». При уменьшении блеска в лучах U и глубины линии поглощения HeI  $\lambda$  4713 Å включается хаотическая переменность рентгеновского потока, доходящая до нерегулярных смен состояний «жесткое — мягкое». Это может быть связано с изменениями размера звезды, приводящими к неустойчивости перетекания вещества.

Е.Д. Мазаева (ИКИ РАН) от имени большой группы исследователей представила доклад «Немонотонности в кривых блеска послесвечений гамма-всплесков». Оптические кривые блеска гамма-всплесков были построены преимущественно на основе оригинальных данных, а рентгеновские — по данным XRT/Swift. Немонотонности выявлялись как отклонения от модельной кривой. Была предложена феноменологическая классификация обнаруженных немонотонностей.

Астрономы ГАИШ МГУ Г.М. Рудницкий, Е.Е. Лехт, Н.Т. Ашимбаева, М.И. Пащенко, совместно с П. Коломом (Франция) и А.М. Толмачевым (ПРАО АКЦ ФИАН), выступили с сообщением «Исследование молекулярного мазерного радиоизлучения переменных звезд поздних спектральных классов». Авторы выполнили многолетний мониторинг мазерного излучения гигантов и сверхгигантов в линиях H<sub>2</sub>O и OH. Выборка включала мириды и полуправильные переменные звезды. Вариации мазерного излучения H<sub>2</sub>O показали задержку 0.3–0.4*P* относительно видимого блеска. У некоторых звезд наблюдались сильные вспышки излучения H<sub>2</sub>O с интервалом в 10–15 периодов. Мазерное излучение в линиях гидроксила обнаружено у 53 звезд. Измерена поляризация излучения. Получены оценки напряженности магнитного поля в мазерных источниках. Особый интерес представляют данные для уникальной симбиотической звезды V627 Cas и пост-АВГ звезды AI CMi.

К.Л. Маланчев, К.А. Постнов и Н.И. Шакура (ГАИШ МГУ) выступили с докладом «Поиск новых видов неустойчивостей в аккреционных дисках». Стандартная модель Шакуры-Сюняева в рамках предположения о турбулентной вязкости хорошо объясняет наблюдаемые проявления дисковой аккреции. Однако сама причина возникновения турбулентности в тонких кеплеровских дисках остается неизвестной. Доклад был посвящен поиску малых возмущений в тонких ламинарных вязких аккреционных дисках. Обнаружено, что при учете зависимости микроскопических коэффициентов вязкости и теплопроводности от температуры возможно возникновения неустойчивых зон в дисках. Найдены условия, необходимые для развития неустойчивостей в ионизованных тонких осесимметричных потоках. И.Ф. Малов, М.А Тимиркеева (ПРАО АКЦ ФИАН) представили доклад «О рентгеновском излучении радиопульсаров». Анализ приводит к выводу о существовании двух популяций пульсаров. Первая включает объекты с длинными периодами, у которых рентгеновское излучение, как правило, не наблюдается или регистрируется только тепловое излучение поверхности. Вторая популяция содержит короткопериодические источники с более интенсивным магнитным полем на световом цилиндре, что позволяет включиться синхротронному механизму и сгенерировать наблюдаемое рентгеновское излучение.

Доклад Д.А. Чулкова (ИНАСАН) «Популяционный синтез визуальных двойных звезд» содержал результаты моделирования распределений визуальных двойных звезд по основным наблюдательным параметрам при различных предположениях о начальной функции масс. Учитывались звездная эволюция, пространственное распределение в Галактике, межзвездное поглощение света, эффекты селекции. Результаты сравнивались с выборкой, основанной на каталоге WDS.

Тем же автором был представлен доклад «Визуальные двойные с известными орбитами в Gaia DR2». Прямое определение динамической массы возможно лишь для систем с известными орбитальными решениями и параллаксом. В докладе обсуждалось применение параллаксов из опубликованного в 2018 г. каталога Gaia DR2 к популяции визуальных двойных с известными орбитами. Были рассмотрены оценки масс звезд, полученные динамически по третьему закону Кеплера, а также с учетом астрофизических соображений.

С.Н. Фабрика (САО РАН) выступил с докладом «Ультраяркие рентгеновские источники». Происхождение таких источников во внешних галактиках связано со сверхкритическими аккреционными дисками. Оптические спектры ультраярких рентгеновских источников подобны спектру объекта SS433, спектрам звезд Вольфа-Райе и LBV-звезд. У объекта NGC247 ULS-1 обнаружен орбитальный период 2 часа; система состоит из гелиевой звезды и черной дыры со сверхкритическим диском. Через несколько десятков тысяч лет вероятно появление второй черной дыры, с последующим слиянием.

Группа авторов из ГАИШ МГУ (С.В. Жуйко, Н.Д. Уткин, А.А. Чемель, А.К. Дамбис) представила доклад «Gaia DR2 и сверхскоростные звезды». Была предпринята попытка поиска сверхскоростных звезд по данным Gaia DR2 в галактическом гало среди переменных типа RR Lyr и в галактическом диске среди звезд главной последовательности спектральных классов A0-A4, выявляемых фотометрически по данным обзоров IPHAS и VPHAS+. Построен синтетический каталог сверхскоростных звезд по данным Gaia в зависимости от механизма выброса и свойств звездной популяции галактического центра.

С.Г. Желтоухов, А.М. Татарников, Н.И. Шатский (ГАИШ МГУ) в докладе «Характеризация спектрального режима камеры ASTRONIRCAM» рассмотрели параметры инфракрасной камеры 2.5-м телескопа Кисловодской горной обсерватории КГО ГАИШ и обсудили особенности редукции данных.

Авторы из ИНАСАН и ГАИШ МГУ (Т.М. Ситнова и др.) выступили с докладом «Химический состав звезд с дефицитом металлов в галактике с ультра-низкой поверхностной яркостью Coma Berenices как индикатор отдельных эпизодов нуклеосинтеза» определили химический состав и параметры атмосфер трех звезд с дефицитом металлов ([Fe/H] < -2) в этой галактике. Новые фотометрические данные в видимой и ИК-области были получены на 2.5-м телескопе КГО, а спектральные наблюдения высокого разрешения взяты из архива телескопа Keck. Определено содержание ряда химических элементов с учетом отклонений от ЛТР. Результатом оказался новый взгляд на историю формирования звезд в галактике Coma Berenices. Широкий диапазон металличности, 0.65 dex, наблюдаемый в ней, связан с неравномерным перемешиванием межзвездного вещества, а не с эволюционным приростом в результате продолжительного звездообразования.

Ю.В. Пахомов, Л.И. Машонкина, Т.М. Ситнова (ИНАСАН), П. Яблонка (Швейцария) в своем докладе «Химическая эволюция карликовой галактики ультранизкой светимости Bootis I» доложили результаты обработки спектров высокого разрешения пяти звезд из этой галактики Bootis I из архива 8-м телескопа Subaru. Определены параметры звездных атмосфер и содержание ряда химических элементов. Обнаруженный в диапазоне металличностей -3 < [Fe/H] < -2 наклон зависимости [ $\alpha$ /Fe] – [Fe/H] отражает появление первых сверхновых типа Ia в галактике и начало производства железа в них.

Ю.В. Пахомов, от имени группы авторов из ИНАСАН, ГАИШ, КрАО, УФУ выступил с докладом «Особенности распределения энергии в спектре активного гиганта PZ Mon». На основе данных многоцветной фотометрии в полосах BVRIJHKL были выявлены особенности распределения энергии в спектре этой звезды, а в 2017–2018 гг. впервые проведен ее мониторинг в инфракрасном диапазоне. Отмечен повышенный ИК-потоке по сравнению с нормальными звездами, а также уменьшение амплитуды колебаний блеска с длиной волны, указывающее на наличие холодных пятен на поверхности звезды. На основе моделирования оценены температуры пятен.

Большая группа авторов из ГАИШ МГУ во главе с Н.И. Шакурой представила доклад «Исследование 35-дневного цикла в двойной рентгеновской системе Her X-1 = HZ Her на основе многолетних широкополосных фотометрических наблюдений». Эта система состоит из нейтронной звезды и обычной звезды-донора. С 1972 г. известна переменность наблюдаемого рентгеновского излучения с периодом около 35 суток. Этот период обусловлен прежде всего вынужденной прецессией наклонного к орбитальной плоскости, изогнутого аккреционного диска. С фазой прецессионного цикла меняются интенсивности струй вещества, перетекающего с оптического компонента, рентгеновская светимость нейтронной звезды, оптическая светимость аккреционного диска. Характер переменности указывает на свободную прецессию нейтронной звезды с периодом, близким к периоду вынужденной прецессии аккреционного диска. Было представлено обсуждение механизма синхронизации этих периодов.

А.А. Ширяев, Л. Сабин, Г. Валявин, Г. Галазутдинов, представляющие Институт физической химии и электрохимии РАН, САО РАН, а также институты из Мексики и Чили, выступили с докладом «О возможности обнаружения эмиссионных линий наноалмазов в окрестностях астрофизических объектов: данные лабораторной спектроскопии и наблюдений». На основе лабораторных данных предложен новый подход к детектированию наноалмазов в астрофизических объектах по эмиссионой полосе 7370 Å создаваемой дефектами кристаллической решетки.

А.А. Шляпников (КрАО РАН) сделал доклад «Анализ нового каталога звезд с активностью солнечного типа». Исследования таких звезд — традиционная область интересов Крымской астрофизической обсерватории.

И.У. Таджибаев и С.Н. Нуритдинов (Национальный университет Узбекистана, Ташкент) представили доклад «О проблеме классификации шаровых скоплений звезд». В сообщении эта проблема была рассмотрена в исторической ретроспективе.

А.И. Еремеева (ГАИШ МГУ) выступила с докладом на стыке нескольких областей астрономии и истории астрономии на тему «Сверхновые, метеориты и ядерная физика: ретроспектива научных взглядов и новые идеи о роли метеоритов в решении некоторых проблем планетной космогонии». В нем объединялись данные о сверхновой 1987А и составе метеоритов и были представлены выводы в поддержку шмидтовской планетной космогонии и против гипотезы о катастрофическом происхождении астероидов и метеоритов.

Доклад Р.Р. Акметдинова (МГУ им. М.В. Ломоносова) был посвящен архивам спектральных наблюдений КрАО, каталогам объектов и изображений. Работа, описанная в докладе, является продолжением ранее начатых исследований по архивным спектральным наблюдениям, выполненных в Крыму. Она охватывает интервал времени около 90 лет и содержит информацию о спектроскопии с использованием от широкоугольных астрографов с объективной призмой до главного телескопа КрАО — ЗТШ. Доклад был проиллюстрирован возможностями сетевого доступа к каталогам наблюдений на различных инструментах в интерактивном атласе неба Aladin с переадресацией к оригинальным спектрограммам. Для них выполнено преобразование линейных координат отсканированных негативов в шкалу, соответствующую длинам волн. Показаны возможности учета спектральной чувствительности регистрируемых изображений по абсолютному распределению энергии у звезд спектрофотометрических стандартов и по промоделированным спектрам. Особенностью представляемой работы является связь оцифрованных оригинальных наблюдений и результатов их независимой обработки с данными, опубликованными для объектов в «Известиях Крымской астрофизической обсерватории».

М.В. Гончарова (СПбГУ) обсуждала эффект отражения в двойных системах с пульсаром. Падение излучения пульсара на поверхность компаньона в двойных системах может приводить к возникновению отраженного излучения в виде периодических импульсов. Характеристики этих импульсов заключают в себе важную информацию о диаграмме направленности пульсара, о свойствах поверхности его компаньона, а также о параметрах орбиты двойной системы. Рассматривалась следующая модель двойной системы с пульсаром:

- 1. компактный источник, который излучает в ограниченном телесном угле и вращается подобно маяку;
- компаньон пульсара представляется эллипсоидом вращения, вытянутым большой полуосью в направлении на пульсар;
- 3. на поверхность компаньона периодически падает излучение пульсара и отражается в направлении наблюдателя.

Исследовалось влияние геометрических размеров эллипсоида вращения, а также орбитального движения в двойной системе на параметры отраженных импульсов. Для нахождения расстояния между источником и точками на поверхности эллипсоида использовался новый метод.

Сообщение М.И. Горностаева (ГАИШ) посвящалось интерпретации спектров транзиентных рентгеновских пульсаров при высоких темпах аккреции. Показано, в частности, что при некотором весьма реалистичном наборе параметров, рассматриваемая в работе модель хорошо согласуется с наблюдениями. Дальнейшее развитие самосогласованной модели излучающих областей, а также продолжающиеся анализ и обработка наблюдательных данных (в том числе изучение поведения циклотронных линий) позволят существенно прояснить вопросы о физической ситуации вблизи магнитных полюсов аккрецирующих нейтронных звезд.

Каталог наблюдений и объектов окрестностей Новой Персея 1992 г. был представлен в докладе А.В. Моргуновой (МГУ им. М.В. Ломоносова). В работе была представлена каталогизация наблюдений и объектов, выполненных в КрАО для области Новой Персея 1992 г. (GRO J0422+32 = V\* V518 Per). Работа проводилась

с целью пополнения базы данных Крымской астрономической виртуальной обсерватории. Для телевизионных изображений, полученных на телескопе MTM-500 KpAO с момента открытия в оптическом диапазоне вероятного кандидата на отождествление с жестким рентгеновским транзиентом GRO J0422+32, выполнено сканирование оригинальных негативов и проведена их астрометрическая редукция. ПЗС наблюдения области на MTM-500 в последние годы позволили оценить состояние V\* V518 Per и каталогизировать объекты окрестности для изучения их возможной переменности. Все данные представлены в форматах, поддерживаемых приложением Международной виртуальной обсерватории — интерактивным атласом неба Aladin и HTML, и доступны на сервере KpAO.

В сообщении А.М. Татарникова (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) обсуждались цветовые уравнения трансформации звездных величин из фотометрической системы 2MASS в систему МКО ИК-камеры ASTRONIRCAM. ИК-камера ASTRONIRCAM, установленная на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ, в фотометрическом режиме работы позволяет получать прямые снимки неба в фильтрах J, H, K стандартной фотометрической системы МКО. Возможность получения точных фотометрических данных зависит, в том числе, от наличия в поле зрения стандартных звезд. Число таких звезд невелико (в роли основных стандартов выступают чуть более 100 звезд), поэтому часто используют звезды, попадающие в поле зрения, блеск которых был определен в ходе обзора 2MASS. Для трансформации звездных величин из системы 2MASS в МКО используют имеющиеся цветовые уравнения, которые были определены по группе основных стандартов. Целью данной работы является определение новых цветовых уравнений. Для этого используются снимки основных стандартов системы МКО. При этом проводится фотометрия не только самих стандартных звезд, но и всех звезд на кадре, для которых определены звездные величины в системе 2MASS. Это позволяет значительно (на порядок) увеличить число звезд, по которым определяются коэффициенты цветовых уравнений.

Также А.М. Татарников (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) представил температурную калибровку показателей цвета J-К и H-К фотометрической системы камеры ASTRONIRCAM для моделей звездных фотосфер Куруца. Фотометрическая система камеры очень близка к стандартной системе МКО (коэффициент при редукции цветов 0.99-1.01). Использование постоянного температурного режима для всех элементов камеры делает ее фотометрическую систему стабильной во времени, а квазиодновременное проведение фотометрии в разных фильтрах повышает точность определения показателей цвета. В работе представлены зависимости показателей цвета J-К и H-К камеры от эффективной температуры звезд, полученные для моделей звездных атмосфер Куруца с различными параметрами [Fe/H] и log g. Показано, что эти показатели можно использовать для определения температур звезд в диапазоне от 4000 до 8000 К, и при точности 0.02 mag определения J-К отклонение температуры модели от соответствующего среднего значения в этом диапазоне составляет от 70 до 200 К.

#### 3. Звездные скопления и ассоциации

Кинематика и шкала расстояний OB-звезд Галактики по данным Gaia DR2 обсуждались в докладе A.C. Расторгуева (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ и физический факультет). Выборка, включающая около 1000 звезд высокой светимости (в основном ранних спектральных классов), была использована для изучения кинематики галактического диска. Проанализированы две фотометрические шкалы расстояний (Дойчмана и Хэмфрис), а также тригонометрические параллаксы и собственные движения Gaia DR2. Методом статистических параллаксов найдены систематические поправки к фотометрической шкале расстояний и к тригонометрическим параллаксам. Показано, что фотометрические шкалы расстояний завышены в среднем на 15%, в то время как тригонометрические параллаксы Gaia DR2 обладают систематической опибкой, составляющей примерно –0.050 мсд, что согласуется с другими новыми данными. Получена кривая вращения и параметры 4-рукавного спирального узора, хорошо согласующиеся с данными по мазерным источникам.

В.И. Корчагин (ЮФУ) исследовал кинематические свойства шаровых скоплений толстого диска и гало Млечного Пути по данным измерений Gaia и HST. Основываясь на данных из каталога Gaia DR2 для собственных движений 150 шаровых скоплений Галактики и данных для их лучевых скоростей, было показано, что по своим кинематическим характеристикам шаровые скопления можно разделить по крайней мере на две подсистемы: толстый диск и гало. Шаровые скопления, принадлежащие толстому диску Галактики, имеют вращательную скорость 120–140 км/сек. При общепринятом значении вращательной скорости локального центроида вокруг центра Галактики, подсистема шаровых скоплений, которую по своим кинематическим свойствам можно отнести к гало Галактики, также имеет заметное вращение около 40 км/сек. Результаты однозначно подтверждают существование системы шаровых скоплений, принадлежащих толстому галактическому диску.

В сообщении Н.Р. Аракелян (АКЦ ФИАН) обсуждалось пространственное распределение шаровых скоплений в Галактике. Известно, что галактики-спутники и шаровые скопления Млечного Пути имеют анизотропное пространственное распределение. Эта анизотропия подробно рассмотрена в докладе с помощью тензора инерции. Предложенный метод воспроизводит известную плоскую структуру в распределении галактик-спутников. Показано, что для шаровых скоплений наблюдаются несколько анизотропных структур. Шаровые скопления на малых расстояниях (2 < R < 10 кпк) показывают структуру, копланарную с галактической плоскостью. На меньших и больших расстояниях вся выборка шаровых скоплений показывает довольно слабую анизотропию. Тем не менее, на больших расстояниях ориентация структуры близка к ориентации галактик-спутников, то есть перпендикулярно плоскости Галактики. Оценена вероятность случайной реализации для этой структуры: P = 1.7%. Шаровые скопления в балдже/диске показывают четкую дискообразную структуру, лежащую внутри галактического диска. Шаровые скопления в старом гало показывают две структуры: хорошо выраженную полярную удлиненную структуру при R < 3 кпк, которая перпендикулярна плоскости Галактики, и менее выраженную дискообразную структуру, копланарную с галактическим диском при 6 < R < 20 кпк. Шаровые скопления в молодом гало не показывают значительную анизотропию.

В докладе А.В. Локтина (КАО УрФУ) на примере скопления Ясли обсуждалось вращение рассеянных звездных скоплений по данным Gaia DR2. Были применены три метода определения вращения скопления по собственным движениям и лучевым скоростям членов скопления. В результате ожидаемая скорость вращения скопления составила 0.4 км/с.

Е.С. Постникова (ИНАСАН) рассмотрела пространственную форму и кинематическую структуру звездного потока, связанного с рассеянным звездным скоплением IC 2391. Для анализа использовались данные Gaia DR2. Определялись положения звезд в диске и пространственные скорости. Была проведена аппроксимация пространственной формы потока и скопления, определены места их образования. Их генетическая связь подтвердилась.

А.Ф. Селезнев (УрФУ) обсудил влияние неразрешенных двойных систем на оценку массы рассеянного звездного скопления, получаемую из звездных подсчетов по функции светимости скопления. Использовались функции светимости пяти рассеянных скоплений (IC 2714, NGC 1912, NGC 2099, NGC 6834 и NGC 7142), полученные с помощью звездных подсчетов по данным 2MASS и Gaia DR2. Предполагалось, что доля двойных не зависит от звездной величины. Использовались различные предположения о распределении масс компонентов двойных систем. Выбор масс компонентов двойной системы, имеющей некоторое значение полной светимости, производилось с помощью метода Монте-Карло. Обсуждается полученная зависимость инкремента массы скопления от доли неразрешенных двойных систем [2].

Доклад М.Е. Шариной (САО РАН) посвящался спектрам интегрального излучения звездных скоплений. Спектры интегрального излучения содержат важную информацию о фундаментальных свойствах звездных населений скоплений, таких как химический состав, возраст и содержание гелия. Такие спектры являются наиболее оптимальным и зачастую единственным способом детального изучения звездных скоплений в других галактиках, для которых ввиду удаленности этих объектов нет возможности получения глубоких диаграмм «цвет — звездная величина» или спектров высокого разрешения отдельных звезд. В докладе были подытожены результаты (в т.ч. авторские) анализа интегральных спектров умеренного разрешения шаровых скоплений в нашей и других галактиках. Акцент сделан на возможности обнаружения множественных звездных населений в объекте, имея в распоряжении только спектры интегрального излучения.

Сообщение А.К. Дамбиса (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) было посвящено определению собственных движений звезд и исследованию кривых блеска переменных типа RR Lyr в поле шарового скопления М5 по данным фотографических наблюдений. С использованием каталога Gaia DR2 была выполнена астрометрическая и фотометрическая редукция данных обработки сканов 84 фотопластинок области шарового скопления M5, снятых в 1970–1988 гг., определены высокоточные абсолютные собственные движения звезд и построены кривые блеска переменных типа RR Lyr в поле скопления. Уточнена радиальная зависимость дисперсии скоростей звезд в короне M5.

В докладе И.А. Ачаровой (ЮФУ) обсуждалось сходство свойств шаровых скоплений, ультракомпактных карликовых галактик и окологалактических газовых облаков. Содержание элементов альфа-процесса и железа в звездах шаровых скоплений отражает состав газовой среды, из которой они образовались. В докладе обсуждалась возможность рассматривать плотные облака окологалактического газа (pLLSs 16.1 < log  $N_{\rm HI}$  < 17.2 и LLSs 17.2 < log  $N_{\rm HI}$  < 17.7), наблюдаемые в окрестности 100–130 кпк от галактик, находящихся на красных смещениях 0.1 < Z < 1.1, как сохранившиеся части облаков, в которых про-изошло образование шаровых скоплений. Выводы сделаны на основе статистического анализа содержания магния и железа в шаровых скоплениях и окологалактических облаках и пространственном расположении обоих типов объектов. Проанализирована эволюционная связь между низкометалличным и высокометалличным компонентами исследуемых объектов.

Е.С. Постникова (ИНАСАН) представила параметры 19 рассеянных звездных скоплений по данным каталога Gaia DR2. Пространственная форма и кинематическая структура этих скоплений были изучены с помощью метода АД диаграмм. Использовались данные астрометрии Gaia DR2. Были определены положения средних апексов, очертания в пространстве областей, занятых звездами скоплений, аппроксимировались с помощью эллипсоидов. Проанализированы особенности формы и расположения скоплений в пространстве. Подготовлен «Атлас АД диаграмм и ХҮ проекций пространственной формы 19 скоплений».

#### 4. Строение, кинематика и динамика Галактики

В.В. Бобылев и А.Т. Байкова (ГАО РАН) исследовали кинематику Галактики по OB-звездам с собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia DR2. Звезды спектральных классов O и B чрезвычайно молоды, распределены по всему галактическому диску и расположены практически там, где родились. OBзвезды являются членами областей активного звездообразования, звездных ассоциаций и рассеянных звездных скоплений. Это делает их важнейшими объектами при изучении кинематики и динамики Галактики, а также ее спиральной структуры. Авторы рассмотрели выборку из 554 OB-звезд с известными лучевыми скоростями, определенными в результате наземных наблюдений, а также тригонометрическими параллаксами и собственными движениями из каталога Gaia DR2. Часть OB-звезд выборки имеет оценки расстояний, сделанные по спектральным линиям кальция. Прямое сравнение с тригонометрическими расстояниями показало, что кальциевую шкалу необходимо сократить примерно на 13%. По 495 OB-звездам с относительными ошибками параллаксов менее 30% определены параметры кривой вращения Галактики и спиральной волны плотности для принятой четырехрукавной модели спирального узора. Изучено влияние звезд пояса Гулда на определяемые параметры вращения Галактики и спиральной волны плотности.

М.Л. Гожа, В.А. Марсаков и В.В. Коваль (ЮФУ) обсуждали надежность параметров атмосфер переменных звезд типа RR Lyr поля. Для ста переменных звезд типа RR Lyr (лирид) галактического поля из авторского сводного каталога с известным химическим составом были определены эффективные температуры и поверхностные ускорения силы тяжести. Были проанализированы результаты публикаций за период с 1995 по 2017 гг. Параметры атмосфер у половины звезд полученного списка определены в двух и более работах, для этих лирид вычислены их средневзвешенные значения параметров. Распределения отклонений авторских определений от соответствующих средневзвешенных описываются нормальным законом, что свидетельствует о случайности расхождения величин параметров, полученных разными авторами. Найдено, что значения  $T_{\rm eff}$  и log g попадают в теоретически рассчитанный диапазон, в котором далеко проэволюционировавшие звезды оказываются переменными. Сделан вывод, что значения эффективной температуры и поверхностной гравитации исследуемых лирид определены достаточно надежно и могут быть использованы для нахождения масс звезд [3].

В докладе В.А. Марсакова, М.Л. Гожа и В.В. Коваль (ЮФУ) обсуждалась природа молодых звезд типа RR Lyr поля с солнечной металличностью. По собранным из литературы параметрам атмосфер с помощью Падуанских эволюционных треков были определены массы ста переменных звезд типа RR Lyr и проведен сравнительный анализ свойств лирид с разным химическим составом. Найдено, что массы богатых металлами ([Fe/H] > -0.5) лирид с кинематикой тонкого диска заключены в интервале (0.51–0.60)M<sub>☉</sub>. Согласно современным представлениям, начальные массы таких звезд должны быть не более (0.7–0.8)M<sub>☉</sub>. Большое время эволюции таких маломассивных звезд входит в противоречие с заметно меньшим возрастом даже самых старых звезд подсистемы тонкого диска Галактики. Предлагается возможное объяснение природы таких сравнительно молодых и богатых металлами переменных [4].

А.Ю. Князев (Южно-Африканская астрономическая обсерватория, МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) представил проект MAGIC — изучение Галактики на основе спектроскопии с телескопом SALT. Телескоп SALT, имеющий 11-метровое составное зеркало и расположенный в Южной Африке, является очень эффективным для определенного рода наблюдательных программ и не очень эффективным для других. Был приведен краткий обзор особенностей телескопа SALT, его аппаратуры и астроклимата места, в котором телескоп расположен. На основе этого анализа были сформулированы основные идеи спектрального проекта MAGIC, проводимого с использованием различных спектрографов, установленных на телескопе. Были показаны первые результаты этого проекта, относящиеся к исследованию выборок лирид и цефеид.

С.Г. Сичевский (ИНАСАН) представил теоретико-вероятностный подход к решению задачи определения межзвездного поглощения. Клочковатая структура межзвездной среды обуславливает большую трудоемкость при выяснении распределения поглощающего вещества на луче зрения. Поэтому несмотря на то, что изучению распределения поглощающего вещества в Галактике посвящены сотни статей, работа до сих пор далека от завершения. В многополосных фотометрических каталогах накоплены результаты наблюдений млн. звезд и неявным образом содержится информация о межзвездной среде. Создание на основе фотометрических наблюдений с использованием априорных данных карты межзвездного поглощения в Галактике, используя теоретико-вероятностный подход, является важной с практической точки зрения задачей. Теоретико-вероятностный подход позволяет использовать любые предварительные знания: область возможных значений оцениваемых характеристик или степень доверия тому, что некоторые их оценки более реалистичны, чем другие. В частности, такой подход позволяет не применять усредненный по всем направлениям в Галактике закон межзвездного поглощения, а варьировать его в области вероятных значений *R*.

Доклад О.Ю. Малкова (ИНАСАН) с коллегами был посвящен определению межзвездного поглощения с использованием Gaia DR2. Авторами была разработана методика определения параметров звезды и значения межзвездного поглощения для нее из многоцветной фотометрии, содержащейся в современных больших фотометрических обзорах. При этом использовались закон межзвездного поглощения и калибровочные соотношения вида «спектральный тип — абсолютная звездная величина» для каждой используемой для анализа фотометрической полосы. Значения результирующих параметров (спектральный тип, расстояние, межзвездное поглощение) находились путем решения системы уравнений для модуля расстояния для каждой используемой фотометрической полосы. Опубликованные недавно параллаксы, полученные в ходе выполнения миссии Gaia (DR2), позволяют осуществить независимую проверку и анализ этих результатов. В докладе были представлены результаты этого анализа, сделаны выводы о применимости разработанной авторами методики. Обсуждались также границы применимости значений межзвездного поглощения, представленных миссией Gaia, а также возможность использования параллаксов Gaia в качестве входного (а не свободного) параметра в методике определения параметров звезды и значения межзвездного поглощения для нее [5].

В.В. Коваль, В.А. Марсаков и М.Л. Гожа (ЮФУ) обсудили содержания химических элементов в шаровых скоплениях Галактики. Был представлен компилятивный каталог средних содержаний химических элементов для 69 шаровых звездных скоплений, найденных в 101 публикации с 1986 г. по 2018 г. Приведены весовые средние величины содержаний 28 химических элементов. Обсуждены ошибки средних величин содержаний в скоплениях. В каталоге приведены также значения расстояния, компонентов скоростей и морфологических индексов строения горизонтальных ветвей.

Доклад В.А. Марсакова, В.В. Коваль и М.Л. Гожа (ЮФУ) был посвящен связи химического состава и кинематики у населения шаровых звездных скоплений в Галактике. Данные составленного компилятивного каталога, содержащего астрофизические параметры 157 шаровых звездных скоплений Галактики, были использованы для анализа связей между химическими и кинематическими параметрами этих объектов. Рассматривалось противоречие между критериями принадлежности скоплений к подсистемам толстого диска и гало по химическим и кинематическим свойствам. Оно заключается в том, что независимо от принадлежности к подсистемам по кинематике почти все металличные ([Fe/H] > -1.0) скопления располагаются близко к центру и плоскости Галактики, тогда как среди менее металличных из любых подсистем много далеких. Приводятся свидетельства того, что все звездные объекты аккрецированного гало являются остатками галактик более высокой массы, чем нынешнее окружение Галактики. Различия в содержаниях  $\alpha$ -элементов у звездных объектов Галактики и окружающих ее менее массивных карликовых галактик-спутников свидетельствуют о том, что последние не оставили заметного звездного следа в ней, кроме, возможно, скопления Rup 106 [6].

Г.А. Гончаров и А.В. Мосенков (ГАО РАН) обсуждали покраснение и поглощение для звезд Gaia. Параллаксы и фотометрия звезд Gaia были использованы авторами для сопоставления распределения звезд на диаграмме Г-Р с теоретическими изохронами PARSEC и MIST с учетом моделей Галактики TRILEGAL и Безансонской. Для учета покраснения звезд и межзвездного поглощения были использованы различные карты и модели. Показано, что двумерные карты с оценками покраснения до бесконечности не могут дать точные оценки покраснения для звезд внутри галактического слоя пыли, т.е. для подавляющего большинства звезд Gaia. Среди трехмерных оценок с теорией лучше согласуются оценки, сделанные авторами ранее. Видимо, покраснение и поглощение в высоких широтах до сих пор было недооценено и в среднем для  $|b| > 50^{\circ}$ составляет E(B - V) = 0.06.

В докладе Г.А. Гончарова и А.В. Мосенкова (ГАО РАН) обсуждались характеристики шаровых скоплений Галактики из сопоставления с теоретическими изохронами. Это первое исследование из серии работ по определению расстояний, возрастов и законов поглощения (зависимости поглощения от длины волны) для шаровых скоплений Галактики из сопоставления их многоцветной фотометрии с теоретическими изохронами. Для шарового скопления NGC 5904 (M5) использована рекордная по точности и содержательности фотометрия в 24 полосах от УФ до среднего ИК диапазона, представляющая диаграмму Г-Р от вершины ветви гигантов до красной части ГП. Основу составили наблюдения из космоса телескопами Hubble, Gaia и WISE. Использованы новейшие изохроны PARSEC, MIST, DSEP и BaSTI, как для металличности солнечной шкалы, так и с повышенным содержанием гелия и  $\alpha$ -элементов. На основе спектроскопических измерений принята металличность [Fe/H] = -1.33. Определены: расстояние 7.4  $\pm$  0.3 кпк, истинный модуль расстояния  $(m - M)_0 = 14.60 \pm 0.11$ , возраст  $12 \pm 1$  млрд. лет, поглощение  $A_V = 0.24 \pm 0.05$ , покраснение  $E(B-V) = 0.054 \pm 0.018$  и  $E(J-Ks) = 0.050 \pm 0.011$ . Найденное расстояние согласуется с общепринятым 7.5 кпк (каталог Harris), но сильно расходится с результатом Gaia DR2 8.8 кпк. Такой же эффект виден и для других шаровых скоплений, что говорит о систематической ошибке параллаксов Gaia DR2 порядка 0.02 mas. Найденный закон поглощения отличается от стандартного, прежде всего, за счет гораздо большего покраснения в диапазоне от 770 до 3300 нм, между полосами Gaia DR2 RP и WISE W1. В результате, истинное поглощение в видимом диапазоне примерно в 2.5 раза больше общепринятого значения ( $A_V = 0.24$  вместо 0.09 из каталога Harris). Аналогичные отклонения закона поглощения от стандартного предполагаются для многих шаровых скоплений Галактики.

Сообщение Г.А. Гончарова и А.В. Мосенкова (ГАО РАН) было посвящено межзвездной поляризации в Местном Пузыре и Поясе Гулда по данным Gaia DR2. Авторы объединили данные оптической линейной межзвездной поляризации из 13 источников данных для 6464 звезд без существенной собственной поляризации из Gaia DR2 в радиусе 500 пк от Солнца. Эти данные были сопоставлены с оценками покраснения звезд из 5 трехмерных карт и моделей. Авторы рассмотрели вариации степени поляризации P, позиционного угла  $\theta$ , покраснения E(B-V) и эффективности поляризации P/E(B-V) в зависимости от галактических координат l и b, расстояния R и нормального цвета. Граница между Местным Пузырем с низкой поляризацией и Поясом Гулда с высокой поляризацией может быть проведена на значении P = 0.1%. P максимальна около срединной плоскости Пояса Гулда, а не около галактического экватора. Слишком высокие значения P/E(B-V) по картам/моделям покраснения других авторов в некоторых областях пространства заставляют предположить систематическую недооценку покраснения в этих случаях. Наиболее точные карты/модели показывают примерно одинаковую объемную плотность пыли E(B-V)/R во всем рассматриваемом пространстве. Падение P в Пузыре по сравнению с Поясом, при сохранении E(B-V)/R может объясняться гораздо более низкой объемной плотностью нейтрального газа (что компенсируется большей плотностью ионизованного газа) при сохранении объемной плотности пыли. В Поясе все вариации P и E(B-V) компенсируют друг друга, давая в результате примерно постоянную P/E(B-V), в том числе и для разных спектральных классов звезд. В Пузыре  $\theta$  показывает хаотическую ориентацию, а в Поясе доминирует гигантская оболочка из пылинок, ориентированных вдоль Местного Межзвездного Туннеля.

Орбитам шаровых скоплений Галактики был посвящен доклад А.А. Чемеля (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ и физический факультет) с соавторами. В частности, обсуждались основные текущие проблемы: недостаточное количество точной информации о положении ШЗС в 6-мерном фазовом пространстве (пространственные координаты и скорости), а также неоднозначность в определении модели гравитационного потенциала, связанная с некорректностью задачи декомпозиции кривой вращения.

Л.Н. Ялялиева (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ и физический факультет) с коллегами исследовала поглощение в полях рассеянных скоплений северного неба. Были исследованы 94 молодых рассеянных звездных скопления северного неба. Для каждого из них были найдены следующие параметры: возраст, расстояние до скопления, среднее собственное движение по данным Gaia DR2, поглощение в полосе r. Было проведено сравнение параллаксов, найденных в данной работе по фотометрическим расстояниям, с данными Gaia DR2.

А.С. Расторгуев и М.В. Заболотских (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ и физический факультет) исследовали кинематику цефеид Галактики по данным Gaia DR2. По выборке, включающей более 500 цефеид, с использованием данных Gaia DR2, были определены кинематические параметры диска Галактики, включая параметры спирального узора. Методом статистических параллаксов была найдена систематическая поправка к тригонометрическим параллаксам, составляющая примерно –0.060 мсд, что согласуется с данными по другим объектам. Выведена кривая вращения и параметры 4-рукавного спирального узора, оценено расстояние до центра Галактики. Скорость вращения на солнечном расстоянии составляет 237 ± 7 км/с.

А.В. Веселова и И.И. Никифоров (СПбГУ) провели анализ структуры участков спиральных рукавов Галактики, выделяемых по классическим цефеидам. В рамках пространственного моделирования сегментов спиральных рукавов на основе метода наибольшего правдоподобия был выполнен структурный анализ элементов спирального узора Галактики по данным о классических цефеидах. Для модели с семью сегментами, выделенными по минимумам распределения позиционного параметра  $X_s$  (координата пересечения модельного логарифмического сегмента с линией центр-антицентр) при различных пробных  $R_0$ , был исследован вопрос о наличии переменности угла закрутки спиральных сегментов. В области, представленной данными, значимых производных угла закрутки не выявлено. На основании этого результата был разработан метод визуализации и тестирования качества многосегментной модели спиральной структуры с неодинаковыми углами закрутки сегментов путем сравнения наблюдаемого и модельного распределения  $X_s$  с учетом ошибок расстояний. Этим методом сравниваются модели с разным количеством сегментов, в частности, при объединении сегментов рукава Стрельца и Местного рукава в различных вариантах. Показано, что модели с объединением двух ранее выделенных сегментов рукава Стрельца и с объединением внешнего сегмента Стрельца и Местного рукава исключаются тестами. При любом варианте указанных объединений модель невозможно согласовать с данными без введения дополнительного тонкого сегмента в области Внешнего рукава.

Н.Д. Уткин (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) с коллегами исследовал кинематику и динамику гало Галактики на основе данных о звездах горизонтальной ветви. Было проведено исследование кинематики гало Галактики на основе выборки звезд горизонтальной ветви — переменных звезд типа RR Lyr, включающей более 9000 объектов с собственными движениями и расстояниями — по двумерному полю скоростей; и выборки звезд голубой части горизонтальной ветви (ВНВ-звезд), включающей более 3000 объектов с собственными движениями, лучевыми скоростями и расстояниями — по трехмерному полю скоростей. Были использованы собственные движения, взятые из 2-го каталога Gaia (Gaia DR2), а для звезд типа RR Lyr также использовались собственные движения, выведенные самостоятельно по позиционным данным, взятым из массовых каталогов на интервале времени до 65 лет. Кинематические параметры, характеризующие поле скоростей, описывались методом максимального правдоподобия, также было исследовано их изменение с расстоянием до центра Галактики. Для звезд типа RR Lyr радиальная дисперсия скоростей в сферической системе координат составляет (160–170) км/с, а значение параметра анизотропии — (0.68–0.72), что неплохо согласуется с результатами предыдущих работ. Для ВНВ-звезд эти величины принимают значения (110–116) км/с и (0.50–0.54). Также благодаря наличию данных о лучевых скоростях удалось определить коэффициент шкалы расстояния и оценить расстояние от Солнца до центра Галактики  $R_0$ . Их значения оказались равными (1.04–1.06) и (8.2–9.0) кпк. Значение  $R_0$  согласуется с результатами предыдущих работ.

Ю.Н. Мишуров и Р.В. Ткаченко (ЮФУ) обсуждали особенности химической эволюции в галактическом диске. Новые наиболее точные и обширные данные о содержании кислорода в звездах-цефеидах поставили перед исследователями проблему объяснения важных особенностей в радиальном распределении кислорода в Галактике. Кислород выбран потому, что он производится в основном одним источником — т.н. сверхновыми второго типа, которые являются очень молодыми объектами, родившимися в спиральных рукавах и не успевшими уйти от места, где они были рождены. Последние данные показали, что распределение кислорода по галактическому радиусу не описывается постоянным отрицательным градиентом по всему галактическому диску, как это моделировалось рядом предыдущих исследователей. Оказалось, что его распределение во внутренней части галактики является убывающим, а вблизи Солнца оно оказывается примерно постоянным. За Солнцем распределение кислорода в среднем описывается опять спадающей с ростом галактического радиуса функцией. Кроме того, имеются и локальные особенности, приводящие к пониженному содержанию кислорода. Для объяснения указанных особенностей в предлагаемой работе развита теория, согласно которой смена спадающего с расстоянным содержания кислорода на распределение в виде плоского плато связывается с влиянием т.н. коротационного резонанса на обогащение галактики кислородом, который располагается вблизи Солнца.

Доклад А.К. Дамбиса (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) с соавторами был посвящен пульсирующим звездам, шкале расстояний и кинематике Галактического гало и толстого диска. Для 500 переменных типа RR Lyr, у подавляющего большинства которых — 450 звезд — до сих пор отсутствовали спектроскопические наблюдения, на 11-метровом телескопе SALT (Южная Африка) впервые получены спектры (R = 1600), определены содержание тяжелых элементов и лучевые скорости. По данным фотометрического обзора ASAS-SN вычислены фотометрические фазы моментов спектроскопических наблюдений и определены поправки к измеренным лучевым скоростям для учета пульсационных вариаций, вычислены лучевые скорости центров масс звезд. На основании полученных данных вместе с ранее опубликованными лучевыми скоростями, металличностями и фотометрическими данными, включая лучевые скорости, определенные в рамках проекта Gaia, определены значения нуль-пунктов зависимостей период-металличность-светимость в разных фотометрических полосах, средние значения скорости ансамблей переменных типа RR Lyr разных металличностей относительно Солнца, а также параметры эллипсоидов остаточных скоростей. С использованием базы данных двойных звезд BDB исследовались перспективы обнаружения и изучения пульсаторов, входящих в двойные и кратные системы определенных наблюдательных типов, позволяющих определить величину большой полуоси орбиты и (или) физических характеристик компонентов в абсолютных единицах. Для таких объектов возможны независимые определения расстояния, потенциально позволяющие уточнить нуль-пункты соотношений период-светимость. Отобраны объекты-кандидаты для дальнейшего исследования.

А.К. Дамбис, А.С. Расторгуев и М.В. Заболотских (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) рассматривали кривую вращения Галактики за солнечным кругом по данным стремгреновской фотометрии и Gaia DR2. По данным фотометрического обзора в системе  $uvbyH_{\beta}$  для ~ 13000 звезд спектральных классов O-F1 в направлении Галактического антицентра и тригонометрическим параллаксам Gaia DR2 уточнена шкала фотометрических расстояний этих звезд и получена оценка систематической ошибки параллаксов Gaia DR2. На основе уточненных фотометрических расстояний и собственных движений Gaia DR2 определен ход кривой вращения Галактики за солнечным кругом до галактоцентрических расстояний ~ 20 кпк.

А.М. Мельник (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) обсуждала резонансные кольца в Галактике и моделирование движения газовых облаков в широкой окрестности Солнца. Модели с аналитическими барами Феррера могут воспроизводить скорости OB-ассоциаций в звездно-газовых комплексах Стрельца, Персея и Местной системы, расположенных в окрестности 3 кпк от Солнца. Рассматривались эллипсоиды Феррера с распределением плотности, определяемой степенями n = 1 и 2. Успех в реконструкции скоростей в Местной системе вызван большой дисперсией скоростей, которая ослабляет резонансные эффекты путем создания меньших систематических движений. Модельные диски формируют внешние резонансные кольца R1 и R2, а также ядерные и внутренние резонансные кольца. В моделях со степенным индексом n = 2поверхностная плотность в кольце R2 примерно в два раза выше, чем в кольце R1, а в моделях с n = 1оба внешних кольца имеют практически одинаковую плотность. Внешний Линдбладовский резонанс бара расположен на расстоянии 0.5 кпк за солнечным кругом, что соответствует угловой скорости вращения бара 50 км/с/кпк. Позиционный угол Солнца относительно большой оси бара, обеспечивающий согласие модельных и наблюдаемых скоростей, составляет 40–52°.

#### 5. Галактики

Доклад А.В. Засова (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) посвящен очагам звездообразования в системах взаимодействующих галактик. Формирование локальных очагов звездообразования (ЗО) в областях с низкой средней плотностью газа (на килопарсековых масштабах) во внешних дисках и приливных структурах галактик остается открытой проблемой, являясь предметом активного обсуждения, особенно в связи с возможностью образования приливных карликовых галактик. Представлены результаты исследования областей ЗО на основе длиннощелевых спектральных наблюдений, проведенных на БТА, систем Arp 42, Arp 58, Arp 82, Arp 194, Arp 270, Arp 305 и NGC 4656. Были изучены динамика газа (скорость и дисперсия скоростей), распределение содержания кислорода (O/H) в каждой системе, возраст звездного населения в областях ЗО. Оказалось, что каждая система обладает своими любопытными особенностями. Во всех рассмотренных случаях локальные островки ЗО либо не являются гравитационно связанными, либо возвращаются обратно в родительскую галактику. Рассмотрены возможные причины, стимулирующие образование межгалактических очагов ЗО.

Анализ наблюдательных данных, касающихся химической эволюция карликовых галактик — спутников Галактики на основе не-ЛТР методов был представлен Л.И. Машонкиной (ИНАСАН). Определены параметры атмосфер и не-ЛТР содержание для 10 химических элементов у 36 звезд с большим дефицитом металлов в 7 карликовых галактиках. Показано, что в классических сфероидальных галактиках в созвездиях Скульптор, М. Медведица, Печь и Секстант элементы  $\alpha$ -процесса Mg, Са и Ті имеют одинаковый избыток относительно Fe: [ $\alpha$ /Fe]  $\simeq 0.3$ . Это согласуется с тем, что наблюдается у звезд гало Млечного Пути (МП). Показано, что в галактике с ультра-низкой поверхностной яркостью Boötes I зависимость [ $\alpha$ /Fe] – [Fe/H] имеет излом при [Fe/H]  $\sim -2.5$ , что указывает на начало производства Fe в SNeIa. Как и в гало МП, в классических сфероидальных галактиках вся выборка звезд разделяется на две подгрушы с различной зависимостью [Sr/Ba] от [Ba/H], что указывает на существование двух каналов синтеза Sr в ранней истории этих галактик. В маломассивных галактиках Boötes I и UMa II отношение Sr/Ba ниже солнечного, поэтому Sr и Ba имеют общее происхождение в r-процессе.

Механизмы формирования «верениц» в звездно-газовых моделях галактик рассматривались в докладе M.A. Бутенко (ВолГУ). Применяется комплексный подход к исследованию возможных механизмов формирования «верениц». Приведены результаты моделирования газодинамических, бесстолкновительных N-body и звездно-газовых дисков, все они демонстрируют формирование полигональных структур как в газе, так и в звездном компоненте. Характерной особенностью полученных результатов при моделировании динамики самосогласованного звездно-газового диска является формирование транзиентной системы верениц, которые выделяются на непродолжительных интервалах времени на фоне развитой спиральной структуры (типа grand design) в звездной и газовой подсистемах. На начальном этапе после формирования спирального узора вереницы наблюдаются чаще, со временем их частота встречаемости уменьшается. Частота появления верениц в газе в среднем в 2...4 раза выше, чем для звезд. Появление верениц в газе и звездах не является одновременным, хотя имеется эффект их согласованного появления.

Исследования сверхоболочек в межзвездной среде близких галактик, формирующихся под действием ветра массивных звезд и последующих взрывах сверхновых, провел О.В. Егоров (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ). В карликовых галактиках, благодаря толстым, богатым газом дискам и отсутствию волн плотности, такие структуры живут гораздо дольше, чем в массивных галактиках, и расширяются до размеров в несколько килопарсек. Представлены результаты продолжающихся наблюдений на 6-м телескопе БТА САО РАН со сканирующим интерферометром Фабри-Перо, направленных на исследование структуры и кинематики ионизованного газа в близких карликовых галактиках. Были обнаружены несколько десятков расширяющихся сверхоболочек ионизованного газа, а также множество диффузных структур в областях звездообразования. Показано, что в основном звездообразование в исследуемых галактиках происходит в протяженных физически связанных областях размером в сотни парсек, расположенных в стенках сверхоболочек HI. Обнаружены свидетельства того, что звездообразование в таких комплексах инициировано столкновением килопарсековых сверхоболочек HI и распространяется внутри этих комплексов, постепенно приводя к разрушению «родительских» сверхоболочек нейтрального водорода.

В докладе Е.С. Егоровой (МГУ им. М.В. Ломоносова) рассматриваются наблюдаемые проявления аккреции газа в галактиках войдов. Галактики в разреженном окружении (войдах) удобны для изучения процесса аккреции внешнего газа, так как приливные возмущения и прямые взаимодействия с компаньонами происходят реже, чем в галактиках поля и в группах. Составлена выборка галактик из войдов Lynx-Cancer и Eridanus, демонстрирующих возмущенную морфологию и/или пониженную металличность для их светимости (по сравнению с выборкой галактик в более плотном окружении). Для проверки гипотезы об аккреции газа на галактики выборки проведены наблюдения с интерферометром Фабри-Перо на 6-м телескопе БТА САО РАН и проанализировали поля скоростей ионизованного газа в линии Н<sub>α</sub>. В большей части галактик выборки, включая изолированные галактики, обнаружены некруговые движения газа, которые могут объясняться аккрецией внешнего газа или приливным взаимодействием. Свойства и вероятные эволюционные сценарии карликовых галактик войдов с самыми низкими металличностями исследуются в работе С.А. Пустильника. Для карликовых галактик давно известна прямая связь между металличностью газа и светимостью (массой звезд) галактики. В контексте формирования галактик и звезд в ранней Вселенной большой интерес представляют карлики поздних типов с низкой металличностью (условно с  $Z < Z_{\odot}/10$ ), которых на сегодня известно порядка 300. Из них наиболее интересны XMP (eXtremely Metal-Poor), т.е. галактики с  $Z_{\odot}/50 < Z < Z_{\odot}/30$ , число которых не превышает полутора дюжин. Большая часть из них найдена в войдах. Именно они показывают необычные свойства: их барионная масса почти на 100 процентов состоит из атомарного водорода и гелия, и возраст их основного звездного населения, оцениваемый из сравнения цветов с модельными эволюционными треками пакета PEGASE, составляет не более 1–3 млрд. лет. Эти карлики являются наилучшими кандидатами в локальные VYG (Very Young Galaxies — предсказанные в моделях весьма редкие Очень Молодые Галактики). Авторы представили сводку их параметров, сравнение с другими XMP карликами и обсуждаем возможные сценарии их формирования и эволюции.

Влияние движения релятивистских радиоджетов на оценки их физических параметров изучается в работе В.С. Артюха. Рассматривается влияние аберрации на наблюдаемую форму и физические параметры релятивистских радиоджетов в активных ядрах галактик. Предложен метод для оценки доплер-факторов радиоисточников, обладающих скоростями, близкими к скорости света.

В докладе М.А. Мардановой (СПбГУ) рассматриваются особенности алгоритма восстановления искаженных изображений в приложении к искаженной карте поверхностной яркости галактик. Путем решения прямой задачи на примере параметрической модели галактики экспериментальным путем получена картина реальной яркости. Ошибки измерений моделируются введением функции рассеяния точки (PSF — Point Spread Function). Размытие изображения является следствием нестабильности оптических свойств атмосферы, а также несовершенством аппаратуры. В качестве экспериментальной реализации PSF обычно используются профили звездных изображений, а в качестве аналитической аппроксимации PSF принимаются профиль Гаусса и его модификации (рассмотренные здесь в ходе реализации численного алгоритма). Показано, что PSF является основной характеристикой, описывающей передачу структуры предмета оптической системой.

Связь звездообразования и гравитационной неустойчивости среды в галактике NGC 628 рассмотрена в работе А.А. Марчука (СПбГУ). Критерий звездно-газовой неустойчивости был применен для случая бесконечно тонкого диска к галактике NGC 628. Вместо использования азимутально усредненных профилей исследовались двумерные карты поверхностной плотности газа (THINGS, HERACLES), дисперсий скоростей звезд (VENGA) и газа (THINGS), а также карта поверхностной яркости (S4G). Были вычислены величины  $Q_{\rm eff}$  для каждого пикселя в исследуемой области с использованием данных о кривой вращения. Показано, что положение неустойчивых областей  $Q_{\rm eff} < 3$  и локализация областей звездообразования ( $\Sigma_{\rm SFR} > 0.007 \ M_{\odot} \ {\rm rog}^{-1} \ {\rm knk}^{-2}$ ) хорошо согласуются друг с другом. Учет влияния эффекта толщины газового и звездного дисков в трехкомпонентной версии (в приближении Romeo 2013) не изменил полученный вывод. В то же время, использование одножидкостного критерия показывает заметно худшее согласие.

В докладе М.Е. Шариной (САО РАН) сравниваются свойства звездных населений центральных шаровых скоплений и звезд поля карликовых сфероидальных галактик с ядром (dSphNs). Большинство dSphNs находятся вблизи центров групп и скоплений галактик. До сих пор известно о существовании лишь одной изолированной dSphN в пределах 10 Мпс. Это KKs3 на расстоянии 2.12 Мпс, открытая И.Д. Караченцевым и соавторами в 2015 г. Истории звездообразования галактик известны из результатов глубокой звездой фотометрии на снимках с Хаббловского телескопа (HST). Возраст и содержание металлов для ядерных шаровых скоплений известны из спектроскопических исследований. Докладчиком были построены и проанализированы профили поверхностной плотности красных гигантов с высокой и низкой металличностью (красных и голубых) в галактиках с помощью функции Серсика. Показано, что:

- 1. профили плотности красных звезд более крутые, чем голубых, что свидетельствует о градиентах металличности и возраста в галактиках;
- 2. центральные шаровые скопления в dSphNs в группах и скоплениях галактик содержат большой процент старых (12–14 млрд. лет) низкометалличных ([Fe/H] =  $-2 \dots -1.5$  dex) звезд в галактиках.

Шаровые скопления, таким образом, являются реликтами первых наиболее мощных вспышек звездообразования в центральных областях этих объектов. Изолированные dSphNs теряют меньший процент старых низкометалличных звезд, вероятно, вследствие незначительного влияния окружения на их эволюцию.

На примере спиральной галактики NGC 6946 Ю.Н. Ефремов (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) пересматривает проблему происхождения округлых областей в газовых дисках галактик (прежде всего спиральных), внутри которых наблюдается пониженная плотность или полное отсутствие газа (HI holes). В зависимости от размеров областей предполагаются разные гипотезы их происхождения. Сквозные небольшие дыры могут образовываться в результате пролета сквозь них карликовых галактик. Характерный размер дыр предположительно соответствует эффективной толщине газового диска вблизи центра галактики. Наиболее вероятный механизм образования больших дыр — случайные процессы в газовых дисках галактик.

О.К. Сильченко (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) представила результаты фотометрического исследования структуры звездных дисков линзовидных галактик в зависимости от плотности их окружения. Результаты анализа включают как статистику типов радиального распределения поверхностной яркости, так и статистику толщин звездных дисков. Вдобавок к 60 S0-галактикам — членам скоплений, результаты для которых были представлены на конференции «Современная звездная астрономия» в 2017 г., были измерены параметры структуры для выборки из 40 изолированных (то есть располагающихся в крайне разреженном окружении) галактик того же морфологического типа, в том же интервале интегральных светимостей. Подтверждается, что в поле (вне скоплений) 20–25% S0-галактик имеют так называемые «обрезанные» радиальные профили поверхностной яркости, тогда как в скоплениях такие галактики практически отсутствуют. Кроме того, были обнаружены и различия в структуре звездных дисков III типа — т.н. antitruncated: у изолированных S0-галактик внутренние сегменты дисков такого типа заметно толще, чем у галактик скоплений, что указывает на возможные различия в их динамике и происхождении.

В работе И.П. Костюк (САО РАН) были исследованы темпы звездообразования в двух галактиках редкого морфологического типа — в кольцевых галактиках NGC 6534 и MCG 11-22-015. Хотя галактики по своим интегральным характеристикам — цвет U–R ~ 2.6 — относятся к т.н. «красной последовательности», в их кольцах идет заметное звездообразование. Чтобы оценить его темп, авторы получили на 6-метровом телескопе САО РАН, с редуктором SCORPIO, узкополосные изображения галактик в эмиссионной линии  $H_{\alpha}$ ; также были привлечены данные фотометрии в двух ультрафиолетовых полосах из архива космического телескопа GALEX. Полученные оценки интегральных темпов звездообразования — несколько десятых масс Солнца в год — помещают наши галактики на т.н. «главную последовательность». Воспользовавшись тем, что оценки темпов звездообразования по эмиссии  $H_{\alpha}$  и по ультрафиолету относятся к разным временным масштабам, авторы качественно оценили ход истории звездообразования в кольцах; в NGC 6534 зависимость SFR от времени оказалась плоской, а в MCG 11-22-015 эмиссия  $H_{\alpha}$  дает темп звездообразования в несколько раз выше, чем ультрафиолет. Таким образом, MCG 11-22-015 — это галактика с молодым кольцом, которое «зажгло» свое звездообразование меньше, чем 100 млн. лет назад.

Изучению структуры магнитных полей во внешних кольцах галактик и их взаимосвязи со свойствами межзвездной среды посвящена работа Е.А. Михайлова (МГУ им. М.В. Ломоносова, физфак). В настоящее время существование магнитных полей в ряде спиральных галактик надежно установлено и практически не вызывает сомнений. С теоретической точки зрения их генерация описывается с помощью механизма динамо, связанного с совместным действием альфа-эффекта и дифференциального вращения. Как правило, они исследуются в так называемом планарном приближении. Исследования последних десятилетий показывают, что в большинстве галактик магнитное поле имеет квадрупольную симметрию. Отдельный интерес представляют внешние кольца галактик, в которых также возможна генерация магнитных полей. Ввиду того, что они имеют другую геометрическую форму, эволюцию поля в них имеет смысл описывать с помощью модели динамо в торе. В ее рамках оказывается вполне возможной генерация магнитных полей дипольной симметрии. Представлены результаты моделирования магнитных полей во внешних кольцах с различной интенсивностью турбулентных движений МЗС. Показано, что при рассмотрении нелинейной модификации уравнений возникновение дипольной моды возможно даже при существенно квадрупольных начальных условиях.

Используя представительную выборку галактик из проекта DustPedia, A.B. Мосенков (ГАО РАН) изучает распределение пыли и звезд в галактиках. Для анализа фотометрических данных инфракрасных КТ Herschel (100–500 мкм) и WISE (3.4 мкм) применяется разработанный им пакет программ DECA. Двумерные профили поверхностной яркости описываются с помощью закона Серсика, один из параметров которого, показатель Серсика n, характеризует форму распределения поверхностной яркости в галактике. Показано, что стандартный подход для описания пылевых дисков с помощью экспоненциального профиля (n = 1), который часто по умолчанию используется в литературе, оказывается неверным для большинства галактик поздних типов — они имеют скорее гауссовы диски (n = 0.5) с усеченным профилем в центре. Объяснением этого наблюдательного факта служит депрессия НІ профиля поверхностной плотности во внутренней области галактики, которая, в свою очередь, определяется достижением максимальной поверхностной плотности атомарного газа в этой области для его перехода в молекулярную форму.

Важнейшим элементом эволюции межзвездной среды (M3C) является звездообразование (ЗО). В работе К.И. Смирновой (УрФУ) сопоставляются локальные индикаторы звездообразования в инфракрасном и оптическом диапазонах (эмиссия в фотометрических полосах на 8 и 24 мкм, эмиссия в линии  $H_{\alpha}$ ) с кинематикой областей ЗО, определяемой по излучению в линии CO, для областей звездообразования из трех галактик: NGC 628, NGC 2876 и NGC 3351, — для которых доступны архивные данные наблюдений в линии  $H_{\alpha}$ . Показано, что излучение в линии  $H_{\alpha}$  хорошо коррелирует как с потоком на 8 мкм, так и в линии CO. Так же наблюдается зависимость потока в линии  $H_{\alpha}$  от параметров, характеризующих поле излучения. Соотношение Ларсона между дисперсией скоростей и размером области ЗО прослеживается до размеров в сотни пк.

Х-структуры и формирующие их звездные орбиты изучаются в докладе А.Д. Паруль (СПбГУ). Х-структуры часто наблюдаются у галактик, видимых с ребра и имеющих так называемые В/PS (ящико-/арахисо-подобные) балджи. Они проявляются как яркий крест, симметрично перечеркивающий центральную часть балджа. Исследователи давно связали В/PS балджи с барами, выросшими в вертикальном направлении за счет орбит, неустойчивых в плоскости бара. Что касается Х-структур — самых заметных особенностей В/PS балджей, то их феномен долго ассоциировали с так называемыми банано-образными орбитами с вертикальным резонансом 2:1. Звезда на такой орбите за один оборот внутри бара совершает две осцилляции в вертикальном направлении и фактически движется вдоль лучей Х-структуры. Анализ наблюдательных данных выявил разнообразие геометрических параметров Х-структур (протяженность и угол раствора лучей), а N-body эксперименты показали, что эти параметров Зависят, в первую очередь, от потенциала подстилающей галактики. Анализ орбит в разных потенциалах не подтверждает доминирование резонансных орбит 2:1 в составе Х-структур. В своей работе авторы показывают, как Х-структура постепенно собирается от центра к периферии из орбит с более низкими резонансами. При таком подходе Х-структуры являются лишь верхней огибающей соответствующих регулярных и околорегулярных орбит.

#### 6. Звездообразование

T.P. Абдульмянов (Казанский государственный энергетический институт) обсуждал условие газодинамического равновесия пылевых оболочек протозвезд и их фрагментацию. В работе была предпринята попытка соединения двух независимо исследуемых процессов — звездообразования и формирования планетных систем. При помощи модели волновых возмущений газопылевой оболочки протозвезд, обосновывается существование и действие волнового механизма фрагментации вещества оболочки и одновременного формирования, в экваториальной плоскости вращения протозвездного облака, протопланетных колец. Получены профили плотности для оболочек протозвезд солнечной массы. Разработана методика расчета интенсивности инфракрасного переизлучения пылевых оболочек протозвезд [7].

А.П. Бисярина (АО УрГУ), А.М. Соболев и А.М. Татарников представили инфракрасный фотометрический мониторинг молодых звездных объектов, связанных со вспыхивающими мазерными источниками. Среди мазерных источников выделяются объекты со вспышками излучения. Такие вспышки могут быть связаны с эпизодической аккрецией, сопровождающейся ростом в ИК. В 2015–2016 гг. для окрестностей S255IR и NGC 6334I при вспышке мазера было впервые зафиксировано повышение ИК излучения молодого звездного объекта. Позже был проведен подробный мониторинг периодического мазера G107.3+5.64 и доказано, что повышению в ИК сопутствует повышение потока метанольного мазера. Наблюдения авторов проводились на 2.5-метровом телескопе КГО ГАИШ в фильтрах К и Н2. В качестве первого результата было получено, что излучение ИК объекта, ближайшего к мазеру G025.65+1.05, заметно уменьшилось по данным в фильтре К, полученным вскоре после прохождения вспышки в сентябре 2017 г., по сравнению с архивными данными, полученными во время спокойного состояния мазера.

Е.О. Васильев (ЮФУ), С.А. Хоперсков и С.С. Храпов доложили о вращении гигантских молекулярных облаков в дисковых галактиках. В рамках трехмерного численного МГД моделирования эволюции дисковых галактик различных морфологических типов была детально исследована внутренняя кинематика гигантских молекулярных облаков. Определены физические свойства облаков, в частности, размер, масса, дисперсия скоростей и др. С помощью синтетических наблюдений модельных галактик для пространственно разрешенных облаков построены модели твердотельного вращения, в рамках которых были рассчитаны градиенты скоростей облаков и их собственный угловой момент вращения. Проведен анализ величины углового момента в зависимости от положения в галактике, морфологии и физических параметров облаков. Обсуждался вклад вращения в общий энергетический баланс молекулярных облаков.

Е.О. Васильев и Ю.А. Щекинов (ЮФУ) обсуждали дисперсию скоростей газа в областях формирования галактических истечений. Кумулятивное действие сверхновых приводит к формированию сверхоболочек в галактических дисках и определяет процесс истечения газа из галактик. В рамках трехмерной газодинамической модели была исследована динамика скоростей межзвездного газа при формировании сверхоболочек в галактическом диске. Были рассчитаны характеристики сопутствующего излучения в оптических рекомбинационных линиях водорода и проведен сравнительный анализ между моделями и наблюдательными данными.

А.И. Васюнин (УрФУ, Ventspils University of Applied Sciences, Ventspils, Latvia) и J.R. Kalnins обсуждали образование сложных органических молекул в холодных ядрах и влияние стохастических эффектов в химии на поверхности пылевых частиц. Было показано, что стохастические эффекты в химии на поверхности межзвездных пылевых частиц, протекающей в холодных ( $\sim 10$ K) плотных (nH $\sim 10^4 - 10^5$  см<sup>-3</sup>) дозвездных ядрах оказывают заметное влияние на эффективность образования сложных органических молекул (COM) в этих объектах. Согласно одному из обсуждаемых в настоящее время сценариев образования сложных органических молекул (сок сложных органических молекул (сок сложных сложных органических молекул (сок сложных сложных сложных органических молекул (сок сложных сложных сложных сложных сложных органических молекул (сок сложных сложных сложных сложных сложных сложных органических молекул (сок сложных слох

ганических молекул в холодном межзвездном газе, формирование COM происходит в химических реакциях в газовой фазе, реактанты для которых образуются на поверхности пылевых частиц, после чего выбрасываются в газ благодаря процессу т.н. химической, или «реактивной», десорбции за счет выделения энергии в экзотермических реакциях на поверхности пылевых частиц.

Поскольку темп поступления реактантов в газ в результате реактивной десорбции зависит от скорости соответствующей поверхностной реакции, важна ее аккуратная оценка. Было показано, что для этого необходим учет при моделировании дискретной природы поверхностных реакций, в особенности, реакций с участием атомарного водорода. Оценки содержаний сложных органических молекул в холодном газе, полученные при моделировании с учетом стохастических эффектов в поверхностной химии, на полпорядка-порядок превышают оценки содержаний, полученные при традиционном моделировании без учета стохастических эффектов.

Д.А. Грачев и Е.А. Михайлов (МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет) представили корреляционную функцию для магнитных полей галактик с интенсивным звездообразованием. При изучении магнитных полей в галактиках с неоднородной средой достаточно разумно использовать уравнения галактического динамо со случайными коэффициентами. Они достаточно полезны для описания магнитных полей в галактиках с интенсивным звездообразованием, взрывами сверхновых и другими подобными процессами, которые существенно меняют свойства межзвездной среды. Ранее были изучены решения уравнения теории динамо, в которых коэффициенты, характеризующие действие галактического динамо, являются случайными, и описываются так называемой моделью с обновлением. Тем не менее, отдельный интерес представляют не только решения данных уравнений сами по себе, но и корреляционная функция, которая позволяет понять взаимосвязь между значениями магнитного поля в различные моменты времени. В работе были представлены результаты исследования поведения корреляционной функции как теоретическими, так и численными методами.

И.И. Зинченко (ИПФ РАН) с коллегами представили наблюдательные свидетельства эпизодической дисковой аккреции при образовании массивных звезд. В настоящее время существуют различные предположения о механизмах образования звезд большой массы. Авторами были проведены исследования области S255IR (расстояние ~ 1.8 кпк), содержащей МЗО с массой около 20 масс Солнца, при помощи антенных решеток SMA, VLA и ALMA с угловым разрешением ~ 0.1" (~ 200 а.е.). Выявлена дискообразная структура, вращающаяся по закону, близкому к кеплеровскому, и биполярное истечение, окруженное плотной оболочкой, для которого также зарегистрированы признаки вращения. Сравнение данных наблюдений SMA в 2010 г. с данными наблюдений на ALMA в 2016 и 2017 гг. показывает, что с 2010 по 2016 г. плотность потока на волне 0.9 мм увеличилась примерно в 2 раза, а в 2017 г. упала примерно на 40%. Примерно так же уменьшилась интенсивность новой мазерной линии метанола на частоте 349.1 ГГц, обнаруженной авторами в 2016 г. Подобное событие наблюдалось недавно и в другом массивном объекте — NGC 6334I-MM1, где интенсивность излучения в континууме возросла примерно в 4 раза. Такие изменения интенсивности согласуются с моделями эпизодической дисковой аккреции, развиваемыми в настоящее время.

М.С. Кирсанова и Я.Н. Павлюченков (ИНАСАН) обсуждали движение молекулярной оболочки в области НІІ RCW120 и звездообразование в ней. Задача об определении начальных условий образования массивных звезд до сих пор не решена. Известно, что до 30% массивных звезд формируется в окрестностях областей ионизованного водорода (НІІ), по-видимому, вследствие сжатия молекулярного газа ударными волнами (УВ). Распространение УВ приводит к формированию плотных движущихся молекулярных оболочки фрагментируют и в них образуются молодые звезды. Однако, до сих пор не было представлено доказательств того, что эти плотные оболочки действительно движутся. Авторы рассмотрели молекулярную оболочку области НІІ RCW120, основываясь на архивных данных телескопа АРЕХ в линиях излучения молекул<sup>13</sup>CO(2–1) и <sup>13</sup>CO(3–2), и показали, что кинематика газа в этой оболочке не противоречит результатам численного моделирования расширяющейся области НІІ, а именно: ширина линий молекул, градиент скорости, а также интенсивность линий согласуются с результатами моделирования. Было также показано, что молодые звездные объекты в этой оболочке конденсируются в наиболее плотных ее частях и избегают тех областей, где ее целостность нарушается.

Д.А. Ладейщиков, О.С. Баяндина и А.М. Соболев представили базу данных метанольных мазеров I класса, обсудили ее современное состояние и перспективы. В последние годы появились новейшие обзоры северного и южного неба в мазерных линиях метанола I класса. Проблема в настоящий момент заключается в том, что имеющиеся опубликованные данные представлены в виде разнородных таблиц в различных статьях, поэтому трудно производить поиск и статистический анализ данных. Единая база данных наблюдений метанольных мазеров I класса позволит качественно решить задачи доступа к этой информации, в том числе поиск, сравнение и анализ данных по всем опубликованным статьям. Созданная база данных упрощает доступ к опубликованным данным, что позволяет более эффективно производить их научный анализ. На фоне возрастающего объема получаемой информации по метанольным мазерам I класса база данных позволяет
добиться полноты статистического анализа данных по имеющейся опубликованной литературе, а также получить исчерпывающую характеристику о мазерном излучении метанола в известных астрофизических объектах.

С.В. Салий, С.Ю. Парфенов и А.М. Соболев (УрФУ) представили обновленную базу населенностей энергетических уровней метанола. Обновлена база населенностей энергетических уровней метанола для условий межзвездных молекулярных облаков, находящихся на различных фазах звездообразования. В базе содержатся населенности уровней, вычисленные в узлах сетки физических параметров. Диапазоны по параметрам:  $n_{\rm H2} - 10^3 - 10^9$  см<sup>-3</sup>,  $T_k - 10$ –600 K,  $N_{\rm CH3OH}/\delta V -$  от  $3.6 \times 10^7 - 10^{14}$  см<sup>-3</sup>× с,  $N_{\rm CH3OH}/N_{\rm H2} - 10^{-9} - 3.6 \times 10^{-6}$ , для ширин линий 1, 3 и 5 км/с. Населенности вычислены для вращательных уровней А и Е-метанола основного, первого и второго крутильных состояний с энергиями 1015.5 см<sup>-1</sup> и 1020.2 см<sup>-1</sup>, соответственно. Моделирование процессов переноса излучения проводилось в приближении большого градиента скорости (LVG) с учетом поглощения и излучения на пыли внутри облака и эффекта блендирования линий. При расчете столкновительных коэффициентов использовалась модель столкновений молекул метанола с атомами Не и с молекулами пара- и орто-Н2. Созданная база населенностей позволяет по данным о яркостях линий метанола быстро оценить физические параметры исследуемых объектов.

А.Р. Андреасян, Т.Ю. Магакян и М.А. Геворкян (Бюраканская АО НАН РА) представили результаты одновременного фотометрического и спектрального исследования новой вспышки V1686 Суg. Был представлен анализ оптических наблюдений звезды AeBe Xepбига V1686 Суg, показывающей фотометрическую переменность до 3–4 величин. Звезда изучалась в рамках проекта по исследованию молодых эруптивных звезд. Наблюдения проводились на 2.6-м телескопе Бюраканской обсерватории. В ходе наблюдений авторы обнаружили, что данная звезда претерпела новую вспышку. После обработки данных выяснилось, что полный цикл подъема на почти 3 величины и дальнейшего падения блеска V1686 Суg занял около двух месяцев. Авторы смогли проследить изменения спектра звезды по ходу вспышки, которые обсуждаются и сравниваются с другими молодыми эруптивными переменными.

Т.Ю. Магакян (Бюраканская АО НАН РА), А.Р. Андреасян, Т.А. Мовсесян, М.А. Геворкян представили доклад о продолжительной эрупция V1318 Cyg S. Необычная молодая эруптивная переменная V1318 Cyg S не менее трех лет назад достигла максимума и сохраняет блеск на прежнем уровне. Были представлены результаты детального анализа фотометрических и спектральных наблюдений этого объекта на 2.6 м-телескопе Бюраканской обсерватории. Амплитуда вспышки достигает 5 величин. В максимуме спектр звезды при очень небольших изменениях показывает признаки направленного истечения вещества с умеренной скоростью, но весьма высокой плотностью. Спектральные и фотометрические характеристики звезды, особенно продолжительный максимум, не позволяют с определенностью классифицировать ее как переменную класса EXor -ов (с некоторыми признаками также и UXor-подобных изменений блеска), равно как и рассматривать ее как аномальный фуор. V1318 Cyg S может явиться еще одним примером так называемых «промежуточных» эруптивных молодых объектов. В любом случае данная звезда, вероятно, относится к типу молодых звезд HAeBe, как и две другие звезды в малой и компактной группе звездообразования, к которой она принадлежит. Кратко обсуждалось эволюционное положение этой группы.

Т.Ю. Магакян и Т.А. Мовсесян (Бюраканская АО НАН РА) представили собственные движения спектрально выделенных структур в истечениях Хербига-Аро. Авторы представили новый метод измерения собственных движений спектрально выделенных структур в истечениях Хербига-Аро по наблюдениям с помощью сканирующего эталона Фабри-Перо в двух эпохах. Наблюдения проводились на 6-метровом телескопе САО с помощью камеры СКОРПИО в режиме Фабри-Перо. Данный метод позволяет выделить морфологические структуры с разными лучевыми скоростями. Первые наблюдения проводились в области потока от HL Тац и выявили структуры, сильно отличающиеся по лучевым скоростям и по морфологии. Структуры с высокой лучевой скоростью представляли собой компактные сгустки, а низкоскоростные — протяженные дугообразные образования. В дальнейшем по этой методике были исследованы другие оптические струи у молодых звезд, в том числе НН 83 и НН 154, где также было выявлено подобное разделение. Для измерения собственных движений кинематически выделенных структур в этих истечениях было решено провести новые наблюдения через 6-10 лет. Обнаружилось, что во всех случаях структуры, сильно отличающиеся по лучевым скоростям, показывают сходные значения собственных движений. Это означает, что фактически эти структуры представляют собой переднюю ударную волну и область обратного ударного возбуждения в сгустках. Другими словами, первая — это дугообразная ударная волна, возбуждающая околозвездную среду, а вторая — возбужденное вещество самой струи. Этот результат свидетельствует, что сгустки в истечениях Хербига-Аро представляют собой внутренние рабочие поверхности, образующиеся как следствие эпизодических выбросов материи из источников.

Л.Е. Пирогов (ИПФ РАН), Л. Деванган и О.Л. Рябухина обсуждали кинематику протяженного волокна в области S242. Были приведены результаты исследования кинематики и физических свойств протяженного газопылевого волокна, связанного с областью образования массивных звезд S242. Длина волокна по данным в линии <sup>13</sup>CO(1–0) составляет более 30 пк. В направлении юг-север вдоль волокна существует градиент лучевой скорости. Ширины линий существенно больше тепловых. Структурная функция, рассчитанная по лучевым скоростям  $^{13}$ CO(1–0), имеет вид степенной функции в диапазоне 0.2–4 пк, что может быть связано со свойствами турбулентности. Температура пыли в южной части волокна (~ 20 K) выше, чем в центральной и северной частях (~ 14 K). По данным C<sup>18</sup>O(1–0) сделаны оценки масс различных участков волокна, а также рассчитаны линейные массы.

Сообщение В.А. Соколовой (УрФУ) с коллегами было посвящено влиянию особенностей мелкомасштабного пространственного распределения пыли на химическую эволюцию межзвездной диффузной среды. Атомарные и молекулярные диффузные облака являются важными объектами межзвездной среды, поскольку считается, что данные объекты представляют из себя промежуточный этап при формировании более плотных холодных облаков и дальнейшего звездообразования. Современные знания о физических и химических процессах, происходящих в диффузных облаках, весьма неоднозначны, а из-за малой оптической толщины наблюдения диффузных облаков как изолированных объектов затруднительны, эволюционные стадии таких объектов определяются химическими часами и отношениями зависящих от времени концентраций молекул. Одной из важных проблем в изучении диффузной среды является задача формирования молекулярного водорода и объяснения его концентраций в среде. Более того, наблюдения показывают, что в диффузных облаках присутствуют молекулы, обилия которых превышают предсказанные и более характерны для холодной плотной среды. В существующих химических моделях диффузных облаков присутствует ряд трудностей в объяснении таких высокий обилий молекул и скорости перехода от атомарного водорода к молекулярному. Ранее была предложена теоретическая модель, в которой в диффузной и плотной среде присутствует особого вида неустойчивость (ионная экранировка — ion shadowing force), способная привести к малому по размеру (<30 a.e.) неоднородному распределению пыли по всему объему диффузных облаков. Авторы рассмотрели физические свойства таких газо-пылевых облаков («клампов»), предположительно формирующиеся за счет этой нестабильности, а также провели анализ возможного влияния таких облаков на химическую эволюцию диффузной межзвездной среды. Для решения данных вопросов авторы провели моделирование диффузной среды с характерными физическими характеристиками: плотность — 100 см<sup>-3</sup>, температура — 100 К, Av — 1. Было показано, что в модели, включающей в себя газо-пылевые сгустки, одиночный кламп является непрозрачным для УФ-излучения, но при этом остается прозрачным для ИК-излучения; при этом, по мере увеличения клампов газ между ними становится более прозрачным, по сравнению с моделью с однородным распределением пыли. Отмечается, что модель диффузной среды с клампами показывает более быстрый переход от атомарного водорода к молекулярному (на порядок меньше), чем в стандартной однородной модели. Таким образом предполагается, что модель с клампами подтверждает быстрый по времени (1–2 млн. лет) эволюционный переход от диффузного облака к молекулярному в стационарном состоянии. Более того, отмечено, что изменения при использовании модели диффузных облаков, включающей в себя клампы, есть: относительные обилия молекул в новой модели в целом намного больше, чем в модели без клампов (разница может превышать 3-4 порядка по величине).

И. Шмелд (Ventspils International Radio Astronomy Observatory Centre) с коллегами представил результаты наблюдений метаноловых мазеров с помощью Вентспилских радиотелескопов. Был представлен обзор программы наблюдений и мониторинга метаноловых мазеров на частоте 6.67 ГГц с помощью Вентспилских радиотелескопов. Были приведены результаты, методика наблюдений и обработки данных, характеристики телескопов.

### 7. Динамика гравитирующих систем

Доклад Э.Д. Кузнецова (УрФУ) посвящен динамической эволюции пар астероидов на близких орбитах. С помощью метрик К.В. Холшевникова, определенных в пятимерном пространстве кеплеровых элементов и в трехмерном фактор-пространстве позиционных кеплеровых элементов, на основе орбит астероидов (нумерованных и наблюдавшихся в нескольких оппозициях) из базы AstDyS, были получены оценки расстояний между орбитами астероидов. Для пар астероидов, у которых метрика Холшевникова менее 0.001 а.е.<sup>1/2</sup>, выполнен анализ на принадлежность к семействам астероидов (по данным базы AstDyS). Оказалось, что часть пар астероидов не принадлежит ни одному из известных семейств. Одним из возможных механизмов формирования семейств и пар астероидов является дробление более крупных тел. Влияние эффекта Ярковского приводит к дрейфу большой полуоси орбиты, что может сопровождаться уходом астероидов из родительских семейств. На основе результатов численного моделирования, выполненного с помощью программы Orbit9 программного комплекса OrbFit, исследована орбитальная эволюция пар астероидов и получены оценки знака и скорости дрейфа большой полуоси, при которых пары астероидов можно связать с семействами астероидов. Эти пары астероидов представляют интерес для исследования генетической связи астероидов с известными семействами.

Предварительные результаты поиска третьего изолирующего интеграла движения методом Монте-Карло в гравитационном поле нашей Галактики представил А.В. Бирюков (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГА-ИШ и К(П)ФУ). Знание сохраняющейся (или примерно сохраняющейся) величины, отличной от интегралов энергии и проекции вектора углового момента на ось z, может быть использовано в качестве дополнительного кинематического уравнения, связывающего пространственные координаты и скорости звезд. Это позволило бы наложить дополнительные ограничения на скорости звезд в тех случаях, когда полное 6-мерное решение для конкретного объекта не может быть найдено (как в случае с одиночными нейтронными звездами). В работе использовалась модель потенциала McMillan. В рамках этой модели были сгенерированы 10<sup>4</sup> траекторий пробных тел в широком диапазоне начальных условий. Начальные положения выбирались случайно до R = 20 кпк от центра Галактики по радиальной координате и в интервале от z = -1до z = 1 кпк относительно плоскости диска, начальные скорости в пределах от -1000 до 1000 км/с для каждого из трех компонентов (в цилиндрической системе координат). Предполагалось, что третий интеграл движения представляет собой функцию мгновенных координат R, z и соответствующих скоростей  $V_R, V_z$ :  $I_3 = |R|^a |z|^b |V_R|^c |V_z|^d$ . Поиск оптимальных значений (a, b, c, d) осуществлялся методом Монте-Карло на интервале от -1 до 1 с контролем тривиальных «псевдо-интегралов» с (a, b, c, d), близкими к 0. Обнаружено, что такая форма сохраняется с точностью лучше 30% для 95% сгенерированных траекторий при оптимальном выборе (a, b, c, d). Обсуждаются дальнейшее развитие метода и уточнение общей формы для 3-го интеграла. Данная работа выполнена в рамках Астрофизической школы для старших школьников фонда «Траектория» (АФШ «Траектория»<sup>1</sup>).

В докладе Ж.М. Ганиева (Национальный Университет Узбекистана) приведены результаты исследований одной из мелкомасштабных неустойчивых мод, найденной из решения дисперсионного уравнения. Последнее было получено ранее для нестационарной бесстолкновительной самогравитирующей модели диска с анизотропной диаграммой скоростей.

С.А. Гасанов (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) представил две новые модели эллиптической галактики. На их основе рассчитаны потенциалы и динамические параметры неоднородной эллиптической галактики (ЭГ). Согласно этим моделям, ЭГ и гало рассматриваются как двухслойное неоднородное трехосное эллипсоидальное тело. Внутренний слой (светящаяся часть ЭГ) представляет собой неоднородное трехосное эллипсоидальное тело, в котором преобладает барионная масса. Плотность светящейся части ЭГ следует так называемому «астрофизическому закону». Внешняя часть представляет собой неоднородный сферический или эллипсоидальный (гомеоидальный) слой, в котором преобладает темная материя. Также исследуется вариант, в котором пропорции темного и барионного вещества во внутреннем слое сопоставимы. Для получения точных результатов потенциалы как светящейся части ЭГ, так и сферического слоя или гомеоида не разлагаются в бесконечные ряды, а используются их точные выражения. Модели являются равновесными и для них сформулирован критерий устойчивости типа Пиблса-Острайкера. Полученные результаты применяются к десяти эллиптическим галактикам; результаты представлены в виде таблиц и рисунков.

Доклад А.О. Громова (СПбГУ) посвящен построению трехкомпонентной штеккелевской модели Галактики. Віппеу в рамках программы описания Галактики в переменных действие-угол разрабатывает метод оценки переменных действия по обычным фазовым координатам, применимый к разделяющимся потенциалам. Наиболее известными из них являются потенциалы Штеккеля, для которых существует третий интеграл движения, квадратичный по скоростям. В предыдущих работах автора были построены однои двухкомпонентные штеккелевские модели Галактики. В данной работе рассматривается вопрос о возможности построения трехкомпонентной, при этом реалистичной, штеккелевской модели Галактики по современным наблюдательным данным для установления практической значимости метода Binney. Представлена трехкомпонентная штеккелевская модель Галактики (балдж, гало, диск), полученная путем сопоставления модельной кривой круговых скоростей с наблюдаемыми значениями азимутальных скоростей мазерных источников с тригонометрическими параллаксами. Введена корректная система весов, учитывающая природную дисперсию скоростей, а также использована процедура выявления и исключения выбросов в данных.

Хаотическая динамика звездных скоплений рассмотрена в работе А.А. Давыденко (СПбГУ). Приведены типичные траектории звездных скоплений в экваториальной плоскости модельной галактики, описываемой двухпараметрическим семейством потенциалов, и для них рассчитаны одномерные показатели Ляпунова. Для области параметров получено распределение значений старшего показателя Ляпунова. Определены области значений параметров, отвечающих хаотическим и регулярным траекториям скоплений.

Перераспределение удельного углового момента вблизи линдбладовских резонансов бара исследовалось в работе А.М. Мельник (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ). Среднее значение удельного углового момента *L* звезд и газовых облаков увеличивается (уменьшается) на радиусах немного меньших (больших), чем радиусы резонансов бара. Этот эффект вероятно связан с существованием двух типов периодических орбит, вытянутых параллельно и перпендикулярно бару, вблизи линдбладовских резонансов. Рассматриваются модели с аналитическим баром.

Двухпланетная задача трех тел с переменными массами, неизотропно изменяющимися с разной скоростью, исследована в работе М.Дж. Минглибаева (Астрофизический институт, Алматы). Предполагается, что родительская звезда расположена в начале координат, а относительные координаты используются для

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>https://www.astroschool.space/

описания движения планет. Получены дифференциальные уравнения движения системы в оскулирующих элементах апериодического движения по квазиконическому сечению. Найденные эволюционные уравнения исследованы численными методами.

Доклад С.Н. Нуритдинова (Национальный университет Узбекистана) посвящен исследованию сильно нестационарных случайных процессов, которые происходят на ранней стадии эволюции самогравитирующих систем при моделировании принудительного бурного перемешивания фаз путем умножения случайных матриц. Изучается поведение выбранного фазового объема под воздействием различных типов случайных толчков, которые имеют, например, вращательный или деформирующий характер. Дается сравнение результатов этих исследования с численным моделированием принудительной релаксации Линден-Белла.

В работе Т.З. Омурканова (ИНАСАН) рассмотрено формирование спиральной структуры галактики M81. Секулярное формирование спиральных узоров дисковых галактик подразумевает их спонтанное возникновение вследствие развития неустойчивости аксиально-симметричного диска. Имеются две точки зрения на возможность формирования спиралей по такому сценарию. Первая (общепринятая) связана с неустойчивостью звездного диска, тогда как вторая рассматривает возможности возникновения различного рода неустойчивостей в газовом диске. Используя методы теории устойчивости показано, что звездный диск галактики M81 является сильно неустойчивым, тогда как газовый диск гравитационно устойчив с большим запасом.

В работе Н.И. Перова (КПЦ им. В.В. Терешковой, Ярославль) изучаются подковообразные траектории малых тел в системах «звезда и планета». В рамках ограниченной круговой задачи трех тел в системе «звезда и планета» найдены устойчивые траектории пробных тел. Такие орбиты оказываются периодическими. Установлен критерий существования подковообразных орбит малых тел с начальными орбитальными радиусами, равными большим полуосям орбит планет: отношение массы звезды  $m_1$  к массе планеты  $m_2$  должно удовлетворять соотношению  $m_1/m_2 > 700$ .

Наличие балджа в центре спиральной галактики затрудняет формирование спирального узора или бара. Особенно это касается галактик с каспом, где плотность быстро растет при приближении к центру. Однако, в литературе известна неустойчивая модель звездного диска с каспом. Используя методы линейной теории устойчивости, Л.В. Шпигель (ИНАСАН) исследует вопрос о возможности формирования спирального узора в аналогичном газовом диске. Обсуждается роль Q-барьера в звездном и газовом дисках.

В работе Е.В. Поляченко (ИНАСАН) впервые численно исследуются модели сферических звездных систем, в которых ранее методами линейной теории была обнаружена новая неустойчивость, аналогичная конусной неустойчивости в теории простейших пробкотронов. В отличие от хорошо известной неустойчивости радиальных орбит, она не приводит к заметному изменению формы скопления, однако влияет на диффузию орбит звезд в фазовом пространстве.

Путем численного моделирования Е.В. Поляченко (ИНАСАН) исследует возможность формирования изгиба диска Галактики и других особенностей вертикального движение звезд в результате взаимодействия с Магеллановыми Облаками (МО). Начальная приливная масса взаимодействующего компаньона составляла ~  $6 \cdot 10^{10}$  масс Солнца. В течение 6 млрд. лет наблюдаются 4 пересечения с плоскостью диска. Первое пересечение оказывает сильное возмущение на Галактику, запуская длительный процесс изменения ориентации центральной области диска. Количественная близость угловой скорости вращения и вертикальной частоты колебаний на периферии диска способствует возникновению долгоживущих структур типа кольца Единорога и изгиба диска, который может составлять 4 кпк на радиусах  $R \sim 25 - 30$  кпк.

В работе А.А. Смирнова (СПбГУ, ГАО РАН) проводится численное моделирование X-структур в дисковых галактиках, видимых с ребра. Имеющийся на сегодняшний день наблюдательный материал показывает, что геометрические параметры X-структур (протяженность, угол раствора между лучами) имеют некоторый разброс, не объяснимый, по-видимому, эффектами проекции. В работе приводятся результаты численных экспериментов для различных моделей дисковых галактик, неустойчивых относительно образования бара, и исследуется связь параметров моделей и X-структур. Анализируются как численные эффекты, так и эффекты, связанные с реальным изменением со временем характеристик X-структур. Параметры X-структур, возникающие в численных экспериментах, сравниваются с параметрами аналогичных образований в реальных галактиках. Делается вывод, что для объяснения существования сплюснутых X-структур (отношение вертикального и радиального размеров ~ 0.4) нужно привлекать модели, в которых масса темного гало в пределах оптического радиуса галактики в несколько раз больше массы диска.

В работе Ю.М. Торгашина (ИНАСАН) анализируются полученные численно глобальные гидродинамические моды в газовом диске спиральной галактики со скачком скорости на кривой вращения (М81, М31). Показана возможность усиления неустойчивых веток колебаний в случае присутствия в центре газового диска заметного уплотнения. Исследовано влияние на неустойчивые моды имитации процессов охлаждения в газовом диске. Получено, что характерные времена формирования глобальных структур оказываются  $\sim 0.5 - 1.0$  млрд. лет [8]. Модель распределения масс в подсистемах дисковой (спиральной) галактики со скачком кривой вращения во внутренней области диска представил Ю.М. Торгашин (ИНАСАН). Им используется пятикомпонентная модель, содержащая старые звездные балдж и диск, молодые звездные балдж и диск, и массивное протяженное гало. Исследована возможность развития в такой модели в (сравнительно маломассивном) газовом диске неустойчивых крупномасштабных гидродинамических мод [9].

В работе Л.М. Чечина и др. (Астрофизический институт, Алматы) получены нестационарные уравнения состояния WIMP-газа для его идеальной и реальной моделей. Соответствующие параметры имеют вид степенной зависимости от времени. Найдены режимы эволюции возмущений небарионной материи, которые описывают их эволюцию при различных характеристиках их внутренней энергии. Оценены размеры и массы затравочных возмущений в WIMP-газе.

Н.И. Перов (ЯрГУ) в своем докладе обсуждал эффект Кодзан-Лидова. Суть этого эффекта состоит в том, что при начальном большом наклоне ( $i \sim 90^{\circ}$ ) плоскости круговой ( $e \sim 0$ ) орбиты малого тела ее эксцентриситет увеличивается (до  $e \sim 1$ ), а наклон уменьшается (до  $i \sim 39^{\circ}$ ) при неизменной большой полуоси a орбиты тела. В работе рассмотрена небесномеханическая модель, основанная на дважды осредненной задаче Хилла с учетом взаимодействия кометного ядра с сжатым центральным телом (Солнцем) и возмущающим телом (ядром Галактики). В рассмотренной модели, с учетом указанных начальных данных, интервал времени миграции кометы из облака Оорта до поверхности Солнца равен  $715 \times 10^6$  лет, что не превосходит возраста Солнечной системы ( $5 \times 10^9$  лет).

### 8. Научные задачи проекта «Лира-Б»

В сообщении А.И. Захарова (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) обсуждалась структура данных космического эксперимента «Лира-Б» и круг решаемых в нем проблем. В настоящее время в ГАИШ МГУ ведется разработка космического эксперимента «Лира-Б». В ходе этого эксперимента будет проведен фотометрический обзор всех объектов до 16<sup>m</sup>. Особенностями этого обзора будут однородность, высокая точность и многоцветность (10 фотометрических полос). Основной задачей эксперимента является создание каталога фотометрических стандартов, т.е. звезд, не являющихся переменными. Однако данные эксперимента можно применить в гораздо большем числе разделов современной звездной астрономии и астрофизики. В докладе излагаются принципы эксперимента «Лира-Б» и структура ожидаемых данных.

В.В. Бусарев (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ, ИНАСАН) посвятил свой доклад возможностям космического эксперимента «Лира-Б» для исследований астероидов. В рамках рассматриваемого проекта с учетом предлагаемого количества фотометрических полос и значений их эффективных длин волн имеется ряд новых потенциальных возможностей при изучении астероидов:

- 1. Повторяющиеся наблюдения большого количества тел на относительно коротком интервале времени (возможность построения их многоцветных кривых блеска, связанных с вращением, а также возможность изучения их отражательных характеристик при разных фазовых углах);.
- Наблюдения объектов в недоступном при наземных наблюдениях коротковолновом диапазоне спектра (3 полосы).
- 3. Квазиодновременное получение наблюдательных данных в широком спектральном диапазоне от дальнего УФ до ближнего ИК (10 полос).
- 4. Постоянный мониторинг распределения энергии в спектре Солнца и возможность использования этих данных для расчета спектров отражения наблюдаемых объектов в режиме реального времени.

Показано, что наблюдательные данные об астероидах, полученные при реализации эксперимента «Лира-Б» на заявленном уровне точности будут представлять значительный интерес.

Сообщение А.К. Дамбиса (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) посвящалось астрометрическим и звездноастрономическим задачам для проекта «Лира-Б». К таким задачам относятся следующие:

- 1. Фотометрическое исследование рассеянных скоплений на основе многоцветной фотометрии для определения основных параметров (расстояние, возраст, содержание тяжелых элементов, избыток цвета, закон межзвездного поглощения), а также тонкая настройка моделей звезд с учетом вариаций степени проникающей конвекции, темпа потери массы, содержания гелия и т.д.
- 2. Уточнение орбит компонентов двойных и кратных систем на основе сочетания позиционных данных проектов «Лира-Б» и Gaia.
- 3. Поиск признаков наличия невидимых спутников звезд по астрометрическим данным (путем сочетания позиционных данных проектов «Лира-Б» и Gaia).

- Исследование и открытие переменных звезд, в особенности, периодических переменных с короткими периодами, повышение точности классификации переменных звезд на основе многоцветной фотометрии.
- 5. Выявление и калибровка зависимостей металличности пульсирующих переменных звезд (в первую очередь, классических цефеид, переменных типа W Vir и переменных типа RR Lyr) от независящих от поглощения цветовых индексов.

В своем докладе Н.В. Емельянов (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ) обосновал включение в проект «Лира-Б» проведения наблюдений спутников планет, необходимых для решения актуальных задач современной практической небесной механики. Было показано, что аппаратурные возможности проекта «Лира-Б» позволяют провести наблюдения спутников планет с получением новых астрометрических данных и уточненных моделей движения спутников. Были сделаны общие замечания относительно астрометрических наблюдений естественных спутников планет с борта искусственного спутника Земли. Обсуждались группы естественных спутников планет, для которых можно планировать наблюдения в проекте «Лира-Б», типы возможных наблюдений, планы возможного использования результатов и другие вопросы.

Э.Д. Кузнецов (УрФУ) обсудил научные задачи наблюдения астероидов в космическом эксперименте «Лира-Б». Было показано, в частности, что предельная звездная величина в панхроматическом свете не позволит обнаружить большое количество новых объектов, но даст возможность получить новые сведения о динамических и физических свойствах более чем 100 тысяч астероидов. По результатам астрометрических наблюдений будут улучшены орбиты астероидов. Высокоточные наблюдения, комбинируемые совместно с ультра-высокоточными наблюдениями Gaia, могут быть использованы при определении масс астероидов на основе оценки взаимных возмущений их движения. Фотометрические наблюдения в 10 полосах от 175 до 1050 нм позволят выполнить массовые определения показателей цвета астероидов для этих полос. Особый интерес представляет полоса в области 700 нм. По этим наблюдениям можно сделать вывод о наличии на поверхности астероида гидратированных материалов.

#### 9. Заключение

Конференция «Современная звездная астрономия — 2018» проводилась 23–26 октября 2018 г. в ГАИШ МГУ и ИНАСАН и была девятой конференцией этого цикла. Предыдущие конференции проводились в ГАИШ МГУ (Москва), ГАО РАН (С-Петербург), ЮФУ (Ростов), КГО МГУ (Кисловодск), УрФУ (Екатеринбург).

Результаты, представленные на конференции, отличались новизной, оригинальностью и актуальностью, а доклады вызвали большой интерес у аудитории, что нашло отражение в большом количестве вопросов, заданных докладчикам, и в бурных дискуссиях в кулуарах. Расширенные тезисы обозреваемых здесь докладов опубликованы в сборнике [10]. Очевидно, линейка конференций «Современная звездная астрономия» будет продолжена.

Организаторы конференции благодарят руководство Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ и Института астрономии РАН за теплый прием и хорошие условия для проведения конференции.

### Список литературы

- 1. O. Malkov, A. Karchevsky, P. Kaygorodov, D. Kovaleva, and N. Skvortsov, *Data*, **3**, 39, 2018.
- 2. O. I. Borodina, A. F. Seleznev, G. Carraro, and V. M. Danilov, ApJ, 874, 127, 2019.
- 3. M. L. Gozha, V. A. Marsakov, and V. V. Koval', Astrophysics, 62, in press, 2019.
- 4. V. A. Marsakov, M. L. Gozha, and V. V. Koval', Astrophysics, 62, in press, 2019.
- 5. O. Malkov, S. Karpov, D. Kovaleva, S. Sichevsky, et al., Galaxies, 7, 7, 2018.
- 6. V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha, Astrophysical Bulletin, 74, in press, 2019.
- 7. T. R. Abdulmyanov, Astrophysical Bulletin, 74, in press, 2019.
- 8. Y. Torgashin and T. Omurkanov, Open Astronomy, 27, 278, 2018.
- 9. Y. M. Torgashin, in B. M. Shustov and D. S. Wiebe, eds., Stars and Satellites, Proceedings of the Memorial Conference Devoted to A.G. Masevich 100th Anniversary, 282–288 (2018).
- 10. O. Y. Malkov, A. S. Rastorguev, and N. N. Samus, in Modern Star Astronomy, volume 1, 8 (2018).

### Радианты и элементы орбит метеороидов комплекса $\delta$ -Канкриды

Соколова М.Г., Сергиенко М.В.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

На основе телевизионных наблюдений изучена структура радиантов северной NCC (код 96) и южной SCC (код 97) ветвей метеорного комплекса δ-Канкрид DCA (код 95). Выполнен анализ распределений больших полуосей и эксцентриситетов орбит метеороидов потока в зависимости от их массы, получены оценки возраста δ-Канкрид. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

### Radiants and orbital elements of meteoroids complex $\delta$ -Cancrids

Sokolova M.G., Sergienko M.V.

Kazan Federal University, Kazan, Russia

The structure of the radiants branches Northern NCC (code 96) and South SCC (code 97) of the meteor complex  $\delta$ -Cancrids DCA (code 95) was studied on basis on the television catalogues of meteor orbits. The analysis of the distribution of semimajor axes and eccentricities of the orbits of meteoroids depending on their masses was performed. The estimates of the  $\delta$ -Cancrid's age were obtained also. Based on a talk presented at the XI International Conference "Near-Earth Astronomy and Space Heritage" (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.3.007

### 1. Введение

Метеорный комплекс  $\delta$ -Канкриды относится к наблюдаемым потокам, подтвержденным Центром метеорных данных MAC (IAU MDC). Метеорный поток наблюдается с 1 по 31 января и не имеет достоверно установленных генетических связей ни с одним малым телом Солнечной системы<sup>1</sup>. Комплекс  $\delta$ -Канкриды DCA (код 95) имеет две ветви: северную NCC (код 96) и южную SCC (код 97), радианты которых расположены в созвездии Рака. Максимальная активность DCA, полученная по визуальным наблюдениям 1987–2006 гг. базы данных Международной метеорной организации (IMO)<sup>2</sup>, для метеоров с регистрируемой звездной величиной  $+3^{\rm m}$  и ярче составляет 8.6  $\pm$  2 метеоров в час в момент, соответствующий эклиптической долготе Солнца 298.50°  $\pm$ 1.20° (J2000.0) [1]. Целью данной работы является изучение структуры радиантов ветвей потока, а также распределения элементов орбит метеороидов  $\delta$ -Канкрид в зависимости от их массы.

### 2. Радианты ветвей комплекса б-Канкрид

Для изучения  $\delta$ -Канкрид были использованы каталоги орбит метеороидов, полученные по телевизионным наблюдениям, в которых орбиты уже отождествленны с конкретным метеорным потоком, а выборка орбит  $\delta$ -Канкрид является репрезентативной. Каталог орбит Японской метеорной сети SonatoCo (далее SonatoCo) содержит 111 и 59 орбит метеоров ветвей NCC и SCC; каталог CAMS v.2.0 (далее CAMS) представляет 75 и 70 орбит NCC и SCC ветвей соответственно. Для каталога SonatoCo ошибки определения скоростей метеороидов главных потоков составляют 20%, малых потоков 30%. В каталоге CAMS для всех параметров приведены индивидуальные ошибки их определения. Однако, в отличие от каталога SonatoCo, в каталоге CAMS не приводятся значения расстояний до метеоров r и их абсолютные звездные величины  $m_{\rm abs}$ . Поэтому данные параметры были вычислены по формулам:

$$r = H \cos Z_{\rm R},$$

$$m_{\rm abs} = m_{\rm v} + 10 - 5\log r,$$

где  $m_{\rm v}$  — видимая звездная величина метеора, H — высота и  $Z_{\rm R}$  — зенитное расстояние в максимуме блеска метеора, приведенные в каталоге CAMS для всех зарегистрированных метеоров.

Координаты  $\alpha$ ,  $\delta$  геоцентрических радиантов ветвей NCC, SCC с учетом их суточных смещений  $d\alpha$ ,  $d\delta$  вычислялись по формулам:

$$\alpha_i^* = \alpha_i - (L_i - L_0) d\alpha,$$
  
$$\delta_i^* = \delta_i - (L_i - L_0) d\delta,$$

 $<sup>^{1}</sup> http://www.astro.amu.edu.pl/{\sim}jopek/MDC2007/$ 

 $<sup>^{2}</sup> http://www.imo.net/data/visual$ 

ветвь	каталог	$V_{ m g}, { m \kappam/c}$	$lpha^{\circ}$	$\delta^{\circ}$	$d\alpha^{\circ}$	$d\delta^{\circ}$
NCC NCC	CAMS SonatoCo	$27.4 \pm 1.9$ $27.1 \pm 3.4$	$\begin{array}{c} 130.4 \pm 3.4 \\ 130.0 \pm 3.1 \end{array}$	$21.7 \pm 1.6$ $19.8 \pm 2.8$	$1.05 \\ 0.22$	$-0.12 \\ -0.00$
SCC SCC	CAMS SonatoCoS	$26.9 \pm 1.8$ $28.0 \pm 3.1$	$     \begin{array}{r} 128.4 \pm 2.4 \\     128.2 \pm 6.0 \end{array} $	$13.9 \pm 1.7$ $13.3 \pm 2.0$	$1.11 \\ 0.11$	$-0.21 \\ -0.06$

Таблица 1: Параметры радиантов ветвей комплекса δ-Канкрид

где  $\alpha_i$ ,  $\delta_i$  — индивидуальные координаты радиантов метеоров без учета их суточного смещения,  $L_i$  — эклиптическая долгота Солнца на моменты регистраций метеоров,  $L_0 = 298.50^{\circ}$  [1]. Ветви NCC и SCC имеют четкую локализацию по склонению радианта (см. рис. 1).

Значения суточных смещений  $d\alpha$ ,  $d\delta$  для каждой ветви определялись по индивидуальным координатам  $\alpha_i$ ,  $\delta_i$  радиантов метеоров методом корреляционного анализа линейных зависимостей  $\alpha_i(L_i)$ ,  $\delta_i(L_i)$ (см. рис. 2).

Параметры геоцентрических радиантов ветвей  $\delta$ -Канкрид, значения их суточных смещений, а также усредненные значения геоцентрических скоростей  $V_{\rm g}$ , вычисленные по данным каждого из телевизионных каталогов орбит, приведены в табл. 1. Положения радиантов ветвей NCC, SCC отличаются с учетом ошибок только по склонению, а значения координат радиантов хорошо согласуются между каталогами орбит.

### 3. Анализ распределений элементов орбит $\delta$ -Канкрид

Исследования показали, что для северной NCC ветви, в отличие от южной SCC, наблюдается уменьшение значений больших полуосей a и эксцентриситетов e орбит метеороидов в зависимости от абсолютной звездной величины метеоров. По данным каталога CAMS (так как в нем приведены индивидуальные ошибки элементов орбит) для метеоров ветви NCC в диапазоне абсолютных звездных величин от  $-2^{\rm m}$  до  $+3^{\rm m}$  на основе линейной аппроксимации были получены изменения больших полуосей  $\Delta a = 0.192$  (a.e.), эксцентриситетов  $\Delta e = 0.023$  орбит метеороидов в зависимости от их массы (см. рис. 3).



Рис. 1: Геоцентрические координаты радиантов δ-Канкрид (NCC северная ветвь — темные кружки, SCC южная ветвь — открытые кружки; CAMS — слева, SonatoCo — справа).



Рис. 2: Геоцентрические координаты радиантов  $\delta$ -Канкрид как функция долготы Солнца L (NCC северная ветвь — темные кружки, SCC южная ветвь — открытые кружки; CAMS — слева, SonatoCo — справа).

Наличие корреляции элементов орбит от массы метеороидов, наблюдаемой для ветви NCC, позволяет выполнить оценку возраста на основе влияния на структуру потока негравитационного эффекта Пойнтинга-Робертсона [2]. Так как родительское тело (РТ)  $\delta$ -Канкрид не установлено, то за элементы первоначальной орбиты на момент выброса метеороидов из РТ примем значения орбитальных элементов средней орбиты потока  $a_0 = 2.23$  (a.e.),  $e_0 = 0.814$ , приведенные в [3]. Оценку возраста  $T_a$  и  $T_e$  выполним по двум формулам [4]:

$$\Delta a = T_a K (2 + 3e_0^2) / a_0 (1 - e_0^2)^{3/2}$$
$$\Delta e = T_e 5 K e_0 / 2a_0^2 (1 - e_0^2)^{1/2},$$

где  $K = 2.51 \times 10^{11} R^{-1} \rho^{-1}$ , R и  $\rho$  — радиус и плотность метеороида.

Расчеты  $T_a$  и  $T_e$ выполним для различных значений плотностей метеороидов, основываясь на классификации химического состава астероидов [5] (1.8 г/см<sup>3</sup> — углеродные С-группы; 2.4 г/см<sup>3</sup> — кремниевые S-группа; 5.0 г/см<sup>3</sup> — железные X-группа).

Таким образом, для северной ветви NCC, приняв массу метеороида M = 0.04 г, что соответствует метеору  $+3^{m}$  [1], для значений изменений орбитальных элементов  $\Delta a = 0.192$  (a.e.) и  $\Delta e = 0.023$  имеем

$$\begin{split} \rho &= 1.8 \ \mathrm{r/cm}^3 \quad R = 0.17 \ \mathrm{cm} \quad T_a = 21.5 \ \mathrm{тыс.} \ \mathrm{лет} \quad T_e = 27.4 \ \mathrm{тыc.} \ \mathrm{лет} \\ \rho &= 2.4 \ \mathrm{r/cm}^3 \quad R = 0.16 \ \mathrm{cm} \quad T_a = 26.0 \ \mathrm{тыc.} \ \mathrm{лet} \quad T_e = 33.2 \ \mathrm{тыc.} \ \mathrm{лet} \\ \rho &= 5.0 \ \mathrm{r/cm}^3 \quad R = 0.12 \ \mathrm{cm} \quad T_a = 42.4 \ \mathrm{тыc.} \ \mathrm{лet} \quad T_e = 54.1 \ \mathrm{тыc.} \ \mathrm{лet} \end{split}$$

Если рассчитать время жизни T метеороида [4], то для метеороидов ветви NCC плотностью 1.8 г/см<sup>3</sup> и массой  $10^{-3}$  г оно составит 22.3 тыс. лет, что сопоставимо с полученными оценками возраста. Это приводит к выводу, что в потоке  $\delta$ -Канкриды преобладают метеороиды с массами выше, чем  $10^{-3}$  г.

### 4. Заключение

На основе телевизионных каталогов метеорных орбит Японской метеорной сети SonatoCo (SonatoCo) и сети камер обзора CAMS v.2.0 (CAMS) уточнены значения прямого восхождения и склонения радиантов, их су-



Рис. 3: Большие полуоси и эксцентриситеты орбит северной ветви NCC в зависимости от абсолютной звездной величины метеоров (каталог CAMS).

точных смещений северной NCC и южной SCC ветвей комплекса  $\delta$ -Канкриды. По данным каталога орбит CAMS получены значения изменений в сторону уменьшения больших полуосей на 0.192 (a.e.) и эксцентриситетов на 0.023 с уменьшением массы метеороидов. Оценки возраста северной NCC ветви потока, выполненные на основе действия негравитационного эффекта Пойнтинга-Робертсона, для метеороидов с массой 0.04 г и плотностью 1.8 г/см<sup>3</sup> и 2.4 г/см<sup>3</sup>, что соответствует астероидам углеродного и кремниевого химического составов, дают значения порядка 25–30 тыс. лет.

### Список литературы

- M. G. Sokolova, M. V. Sergienko, Y. A. Nefedyev, and A. O. Andreev, in 82nd Annual Meeting of The Meteoritical Society, volume 82, 6059 (2019).
- 2. H. P. Robertson, MNRAS, 97, 423, 1937.
- 3. P. Jenniskens, Meteor Showers and their Parent Comets (2006).
- 4. A. C. B. Lovell, Meteor astronomy. (1954).
- S. E. Urban and P. K. Seidelmann, in American Astronomical Society Meeting Abstracts #223, American Astronomical Society Meeting Abstracts, volume 223, 247.20 (2014).

### Блок камер поля космической обсерватории «Спектр-УФ»

Сичевский С.Г., Шугаров А.С., Сачков М.Е., Иосипенко С.В., Архангельский Р.Н., Буслаева А.С., Шустов Б.М.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Блок камер поля (БКП) — это один из основных научных инструментов космической обсерватории «Спектр-УФ» (WSO-UV). В силу различных обстоятельств концепция БКП в ходе работы над проектом менялась. В данной работе кратко описан окончательный вариант БКП, сформированный по результатам эскизного проектирования. Проведено сравнение его характеристик с характеристиками камер поля Космического телескопа Хаббла.

### Field Camera Unit of WSO-UV mission

Sichevsky S.G., Shugarov A.S., Sachkov M.Y., Iosipenko S.V., Arkhangelsky R.N., Buslaeva A.S., Shustov B.M.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The field camera unit (FCU) is one of the primary scientific instruments of the Spektr-UF (aka WSO-UV, i.e. World Space Observatory — Ultraviolet). Due to various circumstances, the concept of FCU changed in the course of work on the project. This paper briefly describes the final version of the BCP, formed based on the results of preliminary design. Its characteristics are compared with those of the Hubble Space telescope's field cameras.

**DOI:** 10.26087/INASAN.2020.5.3.008

### 1. Введение

Блок камер поля (БКП) входит в состав комплекса научной аппаратуры (КНА) космического комплекса (КК) «Спектр-УФ». Основное назначение КК «Спектр-УФ» — это проведение наблюдений в вакуумном и ближнем УФ диапазонах электромагнитного спектра (110–310 нм). Развитие обсерватории «Спектр-УФ» и ее основные характеристики описаны в работах [1, 2, 3, 4, 5], а также в статье Шустова и др. в данном сборнике. Обсуждение научной программы проекта можно найти в работе [6].

БКП вместе с блоком спектрографов (БС) — главные научные приборы и вместе с телескопом Т-170М они составляют основу КНА.

В предыдущем вырианте КНА в него входил БКП под названием ISSIS (Imaging and Slitless Spectroscopy Instrument). Он был предназначен для построения изображений в диапазоне 115-320 нм и проведения бесщелевой спектроскопии. ISISS должен был быть оснащен двумя МКП-приемниками, оптимизированными для разных спектральных диапазонов. Один — с фотокатодом на основе CsI для наблюдений в вакуумном ультрафиолете, второй — на основе CsTe, оптимизированный для ближнего ультрафиолета. Планировалось, что характеристики БКП будут аналогичны характеристикам камер ACS (Advanced Camera for Survey) Космического Телескопа Хаббла (KTX). Стороной, ответственной в проекте за разработку и создание ISSIS, была Испания. Разработка ISISS продвинулась довольно существенно [7], но из-за финансовых затруднений Испания отказалась от дальнейшего развития своего проекта. ГК «Роскосмос» поставил задачу создания нового, уже российского, варианта БКП. При этом, естественно, приветствовалось и участие иностранных партнеров, но в варианте, исключающем непоставку в проект важного научного прибора. В процессе решения этой задачи постепенно была развита концепия нового БКП и разработаны его конструктивные основы (см. например, [8, 9]).

В этой статье кратко изложены результаты эскизного проектирования БКП, завершенного в конце 2019 г., группой сотрудников Института астрономии РАН. Общие характеристики и конструкция БКП описаны в разделе 2. Отдельное внимание уделено важному для построения оптимальной научной программы вопросу фильтров. В разделе 3 приведены выводы.

### 2. Общие характеристики и конструкция БКП

БКП предназначен для получения высококачественных прямых снимков космических объектов в УФ-диапазоне с использованием светофильтров, а также для получения снимков в режиме полевой спектроскопии низкого разрешения. БКП имеет два рабочих диапазона: 115–176 нм (диапазон ВУФ) и 174–305 нм (диапазон БУФ).

В текущем исполнении БКП состоит из совокупности двух изделий: оптико-механического блока (ОМБ) и блоков электроники камер поля (БЭКП), которые размещаются в телескопе Т-170М. Общая компоновка телескопа показана на рис. 1, названия узлов на котором дают представления об их назначении. Требует расшифровки только ППВР-1 и ППВР-2. Это приборные панели внешнего расположения. На рисунке выделены две зоны — зона собственно телескопа и зона инструментального отсека (ИО). В ИО находятся основные приборы обсерватории — БКП и БС.



Рис. 1: Общая компоновка телескопа T-170M (слева). Справа показан вид ОМБ в сборе с узлом главного зеркала.

ИО обеспечивает защиту этих приборов от различных неблагоприятных условий окружающей среды:

- перегрев или чрезмерное охлаждение;
- механические и молекулярные загрязнения, влажность, механические воздействия при наземной эксплуатации;
- радиация и метеорные потоки в условиях штатного функционирования телескопа Т-170М на рабочей орбите;
- паразитный свет (прямой и рассеянный свет от паразитных источников излучения).

### 2.1. Оптико-механический блок

ОМБ размещается в инструментальном отсеке телескопа T-170M и предназначен для выполнения следующих функций:

- получать изображения в диапазоне излучения от 115 до 305 нм в двух независимых каналах канал ВУФ и канал БУФ;
- получать от БЭКП команды и управляющие воздействия;
- выдавать в БЭКП данные наблюдений и служебные данные.

В состав ОМБ, кроме силовой конструкции, оптических элементов и фотоприемных устройств (ФПУ), входят средства обеспечения работы ФПУ: средства, необходимые для решения задачи калибровки каналов, предварительной засветки ФПУ и построения плоского поля. Внешний вид ОМБ представлен на рис. 2.

### 2.2. Блоки электроники камер поля

БЭКП предназначены для управления ОМБ, а также входящих в его состав  $\Phi$ ПУ, и состоит из комплекта трех блоков:



Рис. 2: Общий вид ОМБ.

- блок управления камер поля (БУКП);
- контролер систем камер поля (КСКП);
- блок управления исполнительными механизмами (БУИМ).

При реализации программы научных исследований БЭКП будут обеспечивать:

- выдачу в блок управления научными данными (БУНД) и в блок управления служебным комплексом телескопа (БУСК) наблюдательную и служебную информации;
- получение от БУНД и от БУСК команд и управляющих воздействий.

БУКП и КСКП будут расположены на приборной панели внешнего расположения телескопа Т-170М (ППВР-2). БУИМ будет установлен внутри ИО телескопа в непосредственной близости от ОМБ.

Организацию работы БКП в составе КНА обеспечивает БУКП. С этой целью в БУКП предусмотрены интерфейсы как для релейных команд, так и для SpaceWire, обеспечивающие взаимодействие с БУНД, размещенным на ППВР-2, а также с БУСК, размещенным на панели ППВР-1.

### 2.3. Основные характеристики БКП

В 2019 г. были определены окончательная компоновка и основные характеристики БКП. Определены приемники излучения для обоих каналов (БУФ — ПЗС приемник, ВУФ — приемник на МКП). По сравнению с ISSIS в конструкции БКП было уменьшено количество оптических и подвижных элементов, таким образом увеличена надежность и чувствительность прибора в УФ-диапазоне. Основные характеристики БКП в сравнении с аналогичными камерами КТХ привдены в табл. 1. Данные по КТХ взяты из HST Instruments Handbooks.

По сравнению с камерами КТХ БКП обеспечит меньшее угловое разрешение, однако крупноформатный ПЗС вместе с однозеркальной схемой позволят достичь большого поля зрения — около 7.5' в канале БУФ. Это обеспечит бо́льшую эффективность работы БКП в поисково-обзорном режиме (в англоязычной литературе — discovery efficiency), значительно превосходя по этому параметру аналогичные камеры КТХ. Следует отметить, что БКП будет первым научным УФ-прибором (камерой) для наблюдения с высоким разрешением на геосинхронной орбите, т.е. над основной массой геокороны [9].

В обоих каналах предусмотрено достаточное количество фильтров (см. табл. 2 и табл. 3). Это существенно расширяет возможности БКП для решения научных задач. При выборе набора фильтров мы, естественно, использовали опыт, накопленный на других УФ-обсерваториях, прежде всего на КТХ и GALEX.

Таблица 1: Сравнение характеристик БКП (каналов ВУВ и БУФ) и камер телескопа им. Хаббла — SBC (HST/ACS/SBC) и UVIS (HST/WFC3/UVIS).

Характеристика	ВУФ	БУФ	SBC	UVIS
Тип ФПУ	МКП	ПЗС	МКП, МАМА	ПЗС
Диапазон, нм	115 - 190	170 - 944	115 - 170	200 - 1000
Эфф. площадь, м <sup>2</sup>	0.068	$0.48^{*}$	0.18	0.45
Поле зрения, "	$121 \times 121$	$597 \times 451$	$34.59\times 30.8$	$162 \times 162$
Масштаб, ″/пиксел	0.047	0.146	0.033  imes 0.030	0.0395
Размер ФПУ, мм	30	$49 \times 37$	25	$61 \times 61$
Кол-во пикселей	$2k \times 2k$	$4k \times 3k$	$1k \times 1k$	$4k \times 4k$
Кол-во фильтров	до 10	до 15	6	62
Кол-во призм	до 2	нет	2	нет

\* без учета пропускания светофильтров

Таблица 2: Список фильтров для БУФ-канала. ( $\lambda_{\min}$  — минимальная и  $\lambda_{\max}$  — максимальная длина волны,  $\lambda_{\min}$  — центральная длина волны и FWHM — полная ширина на уровне половинной амплитуды).

Обозначение	Тип	$\lambda_{\min},$ HM	$\lambda_{ m max},$ HM	$\lambda_{ m mid},$ HM	FWHM, нм
F255W	Wide-band	230	280	255	50
F336W	Wide-band	311	361	336	50
F555W	Wide-band	480	630	555	150
F438W	Wide-band	403	473	438	70
F606W	Wide-band	491	721	606	230
F814W	Wide-band	684	944	814	260
F185W	Wide-band	170	200	185	30
F232N	Narrow-band	229.8	234.8	232.3	5
F280N	Narrow-band	277.5	282.5	280	5
F308N	Narrow-band	305.5	310.5	308	5
F656N	Narrow-band	653.8	658.8	656.3	5
F673N	Narrow-band	668	678	673	10
F250LP	Longpass	250	_		
$\operatorname{Gbp}$	Gaia BP	328	671		
Glnuv	GALEX NUV	169	300		

### 3. Заключение

Проведена работа по эскизному проектированию блока камер поля проекта «Спектр-УФ», при этом значительно уменьшена стоимость создания прибора по сравнению с предыдущим вариантом (ISSIS). БКП будет изготовлен в России при участии Испании в части поставки ФПУ для ВУФ канала.

Разработанный вариант БКП имеет высокую чувствительность, большое поле зрения в БУФ. Есть возможность работать не только в УФ, но и в оптическом и ближнем ИК диапазонах (до 1000 нм). МКПприемник ВУФ канала будет работать в режиме счета фотонов, что позволит получать фотометрические данные с миллисекундным временным разрешением. Охлаждение ПЗС-приемника БУФ канала до низкой температуры позволит использовать экспозиции до 10 часов и достичь проницающей способности до 25 звездной величины. БКП будет уникальной астрономической камерой УФ-диапазона, обладающей субсекундным угловым разрешением (в ВУФ даже лучше 0.1") и высокой эффективностью в поисково-обзорном режиме в БУФ.

### Список литературы

- 1. B. Shustov, M. Sachkov, A. I. Gómez de Castro, K. Werner, N. Kappelmann, and A. Moisheev, Ap&SS, 335, 273, 2011.
- 2. B. Shustov, A. I. Gómez de Castro, M. Sachkov, A. Moisheev, et al., Ap&SS, 354, 155, 2014.
- 3. M. Sachkov, B. Shustov, I. Savanov, and A. I. Gómez de Castro, Astronomische Nachrichten, 335, 46, 2014.
- M. Sachkov, B. Shustov, and A. I. Gómez de Castro, in Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray, Proc. SPIE, volume 9905, 990504 (2016).
- 5. B. Shustov, A. I. Gómez de Castro, M. Sachkov, J. C. Vallejo, et al.,  $Ap \mathscr{CSS}$ , **363**, 62, 2018.
- 6. A. A. Boyarchuk, B. M. Shustov, I. S. Savanov, M. E. Sachkov, et al., Astronomy Reports, 60, 1, 2016.
- 7. A. I. Gómez de Castro, P. Sestito, N. Sánchez, F. López-Martínez, et al., Advances in Space Research, 53, 996, 2014.

Обозначение	Тип	$\lambda_{\min},$ нм	Материал
F115LP	Longpass	115	MgF2
F125LP	Longpass	125	CaF2
F140LP	Longpass	140	BaF2
F150LP	Longpass	150	SiO2
F165LP	Longpass	165	Fused silica
PR115	$\mathbf{Prism}$	115	MgF2
PR140	Prism	140	BaF2

Таблица 3: Список фильтров для ВУФ-канала.

- S. G. Sichevsky, B. M. Shustov, M. E. Sachkov, A. S. Shugarov, I. S. Savanov, and E. N. Kanev, in D. V. Bisikalo and D. S. Wiebe, eds., A.A. Boyarchuk Memorial Conference, 377–382 (2018).
- M. Sachkov, B. Shustov, A. I. Gómez de Castro, A. Shugarov, I. Savanov, E. Kanev, S. Sichevskij, and M. Zvereva, in Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin, eds., *Stars: From Collapse to Collapse, Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, volume 510, 573–575 (2017).

# Основные требования, предъявляемые к системе DORIS для контроля геодезических параметров Земли

Кузин С.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Для создания российского сегмента Глобальной геодезической системы наблюдений (Global Geodetic Observing System, GGOS) в нее должны быть включены, по возможности, все основные спутниковые геодезические технологии (как наземные, так и орбитальные средства), функционирующие на территории нашей страны. Одной из таких технологий является французская спутниковая доплеровская радиотехническая система DORIS, несколько передатчиков которой были установлены на территории нашей страны, начиная с 1990 г., при активном участии Института астрономии РАН. В настоящее время система DORIS является одной из основных технологий системы GGOS, вносящих свой вклад в построение и развитие международной земной системы координат ITRF (International Terrestrial Reference Frame). В преддверии выхода новой реализации ITRF2020 в данной статье определены основные требования к сети наземных средств и продуктам системы DORIS.

# The main requirements for the DORIS system for monitoring geodesic parameters of the Earth

Kuzin S.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

To create the Russian segment of the Global Geodesic Observing System (GGOS), it should include, if possible, all the main satellite geodesic technologies (both ground-based and orbital means) operating on the territory of our country. One of these technologies is the French satellite doppler radio system DORIS, several transmitters of which have been installed in our country since 1990, with the active participation of the Institute of astronomy of the Russian Academy of Sciences. Currently, the DORIS system is one of the main technologies of the GGOS system, contributing to the construction and development of the international terrestrial reference frame (ITRF). In anticipation of the release of the new implementation of ITRF2020, this article defines the main requirements for the ground-based means and products of the DORIS system.

**DOI:** 10.26087/INASAN.2020.5.3.009

### 1. Введение

Глобальная геодезическая наблюдательная система GGOS была предложена и создана Международной ассоциацией геодезии (International Association of Geodesy, IAG) в 2003 г. Основными задачами системы GGOS являются [1]:

- обеспечение мирового геодезического сообщества наблюдениями, необходимыми для мониторинга, картографирования и понимания изменений формы и вращения Земли, а также перераспределения масс в твердой, океанической и воздушной оболочках нашей планеты;
- обеспечение глобальной геодезической системой отсчета, являющейся фундаментальной согласованной основой для интерпретации процессов глобальных изменений и для решения различных научных и социальных задач;
- обеспечения фундамента, на котором будут развиваться научные и прикладные исследования в областях наук, изучающих Землю и другие планетарные системы.

Несмотря на то, что GGOS является глобальной международной системой, некоторые страны пытаются создать свои национальные сегменты системы GGOS, например, Япония [2] и Россия [3]. Национальные сегменты системы GGOS активно сотрудничают с глобальной международной системой GGOS, но вместе с тем решают свои национальные задачи. Основными компонентами глобальной (национальной) системы GGOS являются четыре спутниковые геодезические технологии: радиоинтерферометры со сверхдлинными базами (РСДБ), лазерные оптические (квантовые) системы (ЛОС), глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС, в которые входят системы GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Бэйдоу) и французская спутниковая доплеровская радиотехническая система DORIS (Determination of and Integrated Radiopositioning by Satellite). Каждая из вышеприведенных систем решает свои задачи и имеет свои преимущества и недостатки по сравнению с другими спутниковыми системами. Вместе с тем, совместное использование всех систем на одной станции позволяет получить более сильное совместное решение (с математической точки зрения) и определить систематические ошибки каждой отдельной независимой системы по отношению к общему решению. Измерения всех четырех спутниковых геодезических систем используются Международной службой вращения Земли и референцных систем (International Earth Rotation and Reference System Service, IERS) для

получения очередной версии земной системы координат ITRF. К середине 2021 г. планируется реализация системы ITRF2020, в которой будут обработаны данные всех технологий космической геодезии за период, начиная с самого первого момента существования измерений отдельной технологии до конца 2020 г. Так как DORIS-измерения использовались для определения как системы ITRF, так и российской системы координат ПЗ-90.11, то представляется важным определить требования к наземному сегменту системы DORIS в преддверии появления обновлений указанных систем координат. Чтобы измерения каждой спутниковой геодезической технологии были включены в общее решение ITRF необходимо выполнение определенных требований, рекомендованных как IERS, так и Международной Службой DORIS (IDS). В данной статье рассмотрены требования, предъявляемые к наземным средствам и продуктам системы DORIS.

### 2. Задачи, решаемые системой DORIS, и требования, предъявляемые к продуктам и наземным средствам системы

Российский сегмент GGOS должен обеспечивать сбор, архивирование, распространение и анализ геодезических данных, называемых геодезическими параметрами Земли (ГПЗ), к которым относят: фундаментальные геодезические константы, параметры общеземного эллипсоида, общеземную геоцентрическую систему координат (ОГСК), параметры гравитационного поля Земли, параметры связи ОГСК с национальными и международными системами координат. Система контроля геодезических параметров Земли должна расширить наши знания и понимание процессов, происходящих в земной системе, контролировать происходящие в ней процессы, и увеличить нашу способность предсказывать будущее поведение земной системы. Преимущества для пользователей системы контроля ГПЗ состоят не только в доступе к ее продуктам, но и в обратной связи — реакции различных структур системы контроля ГПЗ на запросы потребителей. Социальные выгоды от использования системы контроля ГПЗ проявляются как в инструменте, поддерживающем науки о Земле, так и способности принятия осознанных решений. Система контроля ГПЗ обеспечит согласованные измерения пространственных и временных изменений формы и гравитационного поля Земли, а также вариации вращения Земли. В частности, система контроля ГПЗ обеспечит в глобальном масштабе и в единой системе отсчета средства для временных изменений формы твердой земли, океанов, ледового покрова и поверхности суши. Другими словами, это даст глобальную картину кинематики поверхности нашей планеты и обеспечит, кроме того, оценки аномалий масс, транспорт масс и массообмен внутри земной системы. Кинематика земной поверхности и перенос масс являются ключом к определению глобального баланса масс и важным вкладом в понимание энергетического баланса нашей планеты.

Качество, плотность и однородность сети DORIS станций непрерывно улучшается в течение последних 20 лет [4]. С 50–60 хорошо распределенными станциями, расположенными на поверхности земного шара, данная сеть гарантирует превосходное орбитальное покрытие для спутников, оборудованных DORISприемниками. Плотность и однородное распределение сети DORIS станций вносит, с одной стороны, важный вклад в реализацию ITRF как путем уплотнения сети IERS, так и посредством колокации с оборудованием других геодезических спутниковых технологий, имеющимся у большинства существующих DORIS станций, и, с другой стороны, обеспечивает мониторинг уровня моря с помощью совместного размещения с датчиками приливов для одной трети DORIS станций. Благодаря общему процессу по реконструкции DORIS станций, осуществляемому в последние годы, практически все антенные опоры имеют теперь высокоточные долговременные стабильности контрольной точки антенн. Кроме того, массовое развертывание маяков четвертого поколения обеспечит более высокую производительность и надежность сети. Наземный сегмент сети DORIS станций системы контроля ГПЗ должен, желательно, состоять из 60–70 станций со следующими характеристиками:

- Однородное глобальное распределение станций, охватывающих все основные тектонические плиты. Сеть станций должна позволять определять движение всех основных плит, и обеспечить глобальное и надежное слежение за всеми спутниками, оснащенными приемниками системы DORIS;
- Текущая сеть будет поддерживаться и развиваться. Планируется установка нескольких новых станций для заполнения зазоров в размещении станций или улучшения ее надежности;
- Сеть должна обеспечить поддержку текущих спутниковых миссий (HY2A, JASON-3, Sentinel-3a, Sentinel-3b, Saral), и планируемых будущих миссий (Sentinel-3c, Sentinel-3d, JASON-CS1 и др.), по крайней мере, до 2030 г.;
- На станциях должны быть установлены радиопередатчики системы DORIS четвертого поколения, или последующие более современные маяки, которые улучшат качество и надежность измерений;
- Большее количество наземных маяков должны быть подключены к атомным стандартам времени и частоты для обеспечения высокоточной привязки к Международному атомному времени (IAT);

		Частота		Задержка
Продукты	Точность	получения	Разрешение	получения
		решений		продуктов
Недельное	Х: 3.10 мм	Ежеквартально	1 неделя	1 квартал
решение	У: 3.22 мм			
координат	Z: 12.73 мм			
станций.				
Скорости	X: 0.55 мм/год			
станций	У: 0.27 мм/год			
	Z: –5.38 мм/год			
Движение	X: ~210 мкс дуги	Нерегулярно	1 день	Нерегулярно
полюса	Y: ~210 мкс дуги			
Координаты	Х: –1.2 мм	Нерегулярно	1 день	Нерегулярно
геоцентра	Y: -2.0 мм			
	Z: -10.7 мм			
Орбиты	1-3 см	В зависимости	В зависимости	В зависимости
альтиметрических	радиальной	от миссии	от миссии	от миссии
миссий	компоненты			
	орбиты			

#### Таблица 1: Основные требования к продуктам системы DORIS

- Все DORIS станции должны быть оборудованы прецизионными метеорологическими датчиками, позволяющими выполнение высокоточной атмосферной коррекции измерений;
- Долговременная стабильность опорных точек антенны должна быть на сантиметровом уровне на временных шкалах в несколько десятилетий;
- DORIS оборудование будет использоваться на станциях колокации, т.е. совмещена с оборудованием других космических геодезических технологий (ЛОС, РСДБ, ГНСС). Интерференция между частотами DORIS и РСДБ будет исследована и решена, по мере возможности;
- Однородное глобальное распределение станций совместно с мареографами поможет точно отслеживать изменение уровня моря.

Основными задачами, решаемыми системой DORIS, являются:

- участие в создании и поддержке Международной земной системы координат ITRF и российской ПЗ-90.11;
- определение параметров вращения Земли (ПВЗ);
- мониторинг движения геоцентра;
- определение орбит низкоорбитальных космических аппаратов.

В табл. 1 приведены основные требования к продуктам системы [5].

### 3. Заключение

Так как система DORIS является одним из компонентов системы GGOS и участвует в создании и поддержке Международной земной системы координат ITRF и российской ПЗ-90.11, то представляется важным определение путей дальнейшего развития системы DORIS. В преддверии выхода очередной реализации глобальной земной системы координат ITRF2020 в статье приведены требования к наземному сегменту системы DORIS и к точности основных продуктов системы, получаемых в процессе постобработки измерений системы DORIS.

### Список литературы

- 1. H.-P. Plag and M. Perlman, Global Geodetic Observing System, 1-332, 2009.
- 2. T. Otsubo, B. Miyahara, S. Kurihara, and Y. Yokota, GGOS Meetings, 1-9, 2019.
- 3. A. Ipatov, I. Gayazov, S. Donchenko, S. Karutin, and V. Shargorodsky, Geodesy and Geodynamics, 8, 90, 2017.
- 4. J. Saunier, Advances in Space Research, 58, 2725, 2016.
- 5. IDS, https://ids-doris.org.

# Разработка предложений по построению системы контроля геодезических параметров Земли

Кузин С.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Необходимость разработки и создания российского сегмента системы контроля геодезических параметров Земли (ГПЗ) обуславливается требованиями потребителей к точности измерения параметров, оперативности их получения и доступности. Система контроля ГПЗ должна стать основой для фундаментального геодезического обеспечения российской спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС. Система контроля ГПЗ должна состоять из наземного и орбитального комплексов измерительных средств, с учетом их перспективного развития, центров сбора, обработки и хранения данных и соответствующей инфраструктуры для надежного функционирования системы. Система контроля ГПЗ должна основываться на уже имеющейся на данный момент инфраструктуре, а также включать недостающие критически важные элементы (космические системы и комплексы, наземные средства наблюдений, системы наблюдений Земли из космоса). В работе приводятся основные предложения по разработке общего вида системы контроля ГПЗ.

## Development of proposals for the construction of a system for monitoring geodetic parameters of the Earth

Kuzin S.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The need for development and creation of the Russian segment the system for monitoring geodesic parameters of the Earth (GPE) is determined by the requirements of consumers to the accuracy of measuring parameters, the speed of their acquisition and availability. The control system of the GPE should become the basis for fundamental geodesic support for the Russian GLONASS satellite navigation system. The system for monitoring GPE should consist of ground-based and orbital complexes of measuring instruments, taking into account their prospective development, data collection, processing and storage centers, and appropriate infrastructure for reliable operation of the system. The system for monitoring GPE has to use what is already available at the moment, as well as includes the missing critical elements (space systems and complexes, ground-based observation means, Earth observation systems from space). The paper presents the main proposals for the development of the general appearance of the system for monitoring GPE.

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.3.010

### 1. Введение

В настоящее время набор средств геодезии состоит из разнообразных технологий космического и наземного базирования, которые совместно позволяют выполнять детальные наблюдения фундаментальных геодезических параметров Земли в широком пространственном и временном диапазонах. Совместным использованием наземных, воздушных и космических технологий современная геодезия определяет и контролирует изменения формы Земли, ее гравитационного поля и вращения с беспрецедентной точностью, разрешением (как временным, так и пространственным) и долговременной стабильностью. В то же самое время геодезические измерительные технологии находятся в постоянном развитии, расширяя наблюдательные возможности современных технологий в областях точности, пространственного и временного разрешения, наблюдаемых параметрах, задержке измерений и их качестве. Комбинирование данных наблюдений различных технологий обеспечивает основу для определения и мониторинга небесной (ICRF) и земной (ITRF) систем отсчета, как метрологической базы для всех земных наблюдений. Перспективная система контроля ГПЗ разрабатывается для удовлетворения нужд наиболее требовательных научных и социальных пользователей системы с точки зрения точности, временных и пространственных разрешений, задержки получения продуктов.

Основными задачами системы контроля геодезических параметров Земли являются:

- определение небесной системы координат;
- определение земной системы координат, включая геоиды;
- определение геодезической системы координат;
- определение гравитационной системы отсчета;
- определение физических и математических моделей, необходимых для анализа данных системы контроля ГПЗ;
- получение и поддержание высокоточной, стабильной и однородной небесной системы отсчета;

- получение и поддержание высокоточной, стабильной и однородной земной системы отсчета, включающей движение геоцентра;
- обеспечение и поддержка вариаций параметров вращения Земли (ПВЗ), которые используются для преобразования координат из небесной системы отсчета в земную систему отсчета и наоборот;
- обеспечение основных моделей, базовых определений и постоянных для геодезической координатной системы;
- получение и поддержание параметров, описывающих статические и изменяющиеся во времени компоненты гравитационного поля Земли;
- обеспечение и поддержание параметров, описывающих статические и изменяющиеся во времени компоненты формы Земли, океанических поверхностей и ледяных покровов;
- получение и поддержание параметров, описывающих общую концентрацию электронов в ионосфере;
- получение и поддержание параметров, описывающих содержание водяных паров в тропосфере;
- получение и поддержание параметров, описывающих массообмен между атмосферой, океанами и твердых участков земной поверхности.

В качестве международной небесной системы координат используется International Celestial Reference System (ICRS) [1], принятая в 1997 г. Международным астрономическим союзом (MAC). Началом отсчета ICRS является барицентр Солнечной системы. Оси системы зафиксированы в пространстве относительно квазаров, которые считаются наиболее удаленными объектами наблюдаемой Вселенной. Их предполагаемое собственное движение настолько мало, что им можно пренебречь, то есть ICRS считается квазиинерциальной системой. В настоящее время небесная система координат поддерживается Международной службой вращения Земли и референцных систем координат (IERS) и реализуется посредством последовательных международных небесных системы отсчета (International Celestial Reference Frame, ICRF). ICRF необходима для выражения положения небесных тел в инерциальной (квазиинерциальной) системе отсчета.

В качестве международной земной системы координат используется International Terrestial Reference System (ITRS) [1], принятая в 2007 г. Международным союзом геодезии и геофизики (IAGG). Началом отсчета является центр масс Земли (включая океан и атмосферу). Ориентация осей определяется IERS. Система вращается вместе с Землей и не является инерциальной. Практической реализацией ITRS является Международная земная система отсчета (ITRF), которая также поддерживается IERS. Система ITRF реализуется в виде фиксации на поверхности Земли декартовых скоростей и координат опорных точек на определенную эпоху. Последней реализацией ITRF является ITRF2014. ITRF необходима для выражения положения любой точки земной поверхности в данной системе. На тех же теоретических положениях, что и ITRS, строится российская глобальная система координат ПЗ-90.11 [2]. Небольшие различия в параметрах систем ITRS и ПЗ-90.11 при практических воплощениях могут быть объяснены различием в составе и объеме использованной измерительной информации и методическими различиями.

По заданиям Росреестра и Роскартографии в 2006–2010 гг. под методическим руководством Центрального научно-исследовательского института геодезии, аэросъемки и картографии (ЦНИИГАиК) была разработана государственная геодезическая система координат 2011 г. (ГСК-2011) [3]. Также активное участие в ее разработке принимали организации Роскосмоса, Росстандарта и РАН. Закономерным итогом этих работ явилось введение ГСК-2011 для выполнения геодезических и картографических работ на территории России. По уровню точности и принципам ориентации в теле Земли системы координат ГСК-2011 и ПЗ-90.11 соответствуют друг другу, а также международной системе координат ITRF. Различия между ними состоят только в составе геодезических пунктов, реализующих данные системы координат, и скоростях изменения положения этих пунктов вследствие геодинамических процессов. Целесообразность введения системы координат ГСК-2011, которая является геоцентрической, состояла в повышении эффективности использования спутниковых технологий координатных определений, что в свою очередь должно повысить точность и оперативность решения задач геодезического обеспечения, отвечающего современным требованиям экономики, науки и обороны страны. Кроме того, введение системы координат ГСК-2011 повысит эффективность использования системы ГЛОНАСС и осуществления мониторинга деформаций земной поверхности, что чрезвычайно важно при решении как народнохозяйственных, так и целого ряда научных задач. Система координат ГСК-2011 формально относится к классу референцных систем координат, то есть систем координат, устанавливаемых для отдельных стран (регионов), несмотря на то, что на этапе своего создания она была согласована с ITRF2008.

Гравиметрическую основу РФ реализует высокоточная государственная гравиметрическая сеть, которая представляет собой совокупность закрепленных на местности и гравиметрически связанных между собой пунктов, на которых выполняются относительные или абсолютные измерения ускорения силы тяжести и осуществляется определение высот и координат этих пунктов. В настоящее время государственная гравиметрическая сеть состоит из 71 пункта государственной фундаментальной гравиметрической сети, 54 из которых совмещены с пунктами ФАГС (фундаментальная астрономо-геодезическая сеть), и 690 основных пунктов государственной гравиметрической сети 1-го класса [3]. Дальнейшее развитие государственной фундаментальной гравиметрической сети с точки зрения экономии финансовых и материальных затрат планируется вести по пути совмещения ее пунктов с новыми пунктами ФАГС. Развитие же государственной гравиметрической сети 1-го класса не целесообразно в силу того, что она создавалась с помощью маятниковых относительных определений ускорения силы тяжести, которые в настоящее время повсеместно заменяются абсолютными высокоточными измерениями.

### 2. Разработка базисных предложений по внешнему виду системы контроля ГПЗ

Система контроля ГПЗ должна обеспечивать данные в пространстве, времени и гравитационном поле Земли с точностью 10<sup>-9</sup> [4] относительно размеров Земли (ее радиуса). Одной из важнейших особенностей системы контроля ГПЗ является ее способность интегрировать три традиционные фундаментальные геодезические задачи:

- 1. определение и мониторинг геометрии поверхности Земли;
- 2. контроль за параметрами вращения Земли;
- 3. определение гравитационного поля Земли и геоида.

Явления глобальных изменений очень малы и поэтому трудно поддаются измерению. Часто измерения не могут быть проведены непосредственно. Поэтому их получают из данных комплементарных сенсорных и наблюдательных систем и сравнивают с численными моделями.

При проектировании системы контроля ГПЗ ее разработчикам необходимо решить следующие задачи:

- различные спутниковые геодезические системы, состоящие как из непосредственно измерительных приборов, так и из пунктов, устанавливающих связь, между наземными станциями и спутниками, должны обеспечивать измерения в единой глобальной системе отсчета. Таким образом все космические геодезические технологии, гравиметрические технологии, соответствующие астрометрические технологии и миссии должны быть унифицированы и интегрированы для достижения точности 10<sup>-9</sup>. Все глобальные сети измерений должны оперировать в единой земной координатной системе с указанной точностью;
- космический сегмент должен быть дополнен наземными и воздушными/корабельными измерениями, что дает возможность получения более высокого разрешения измеряемых параметров;
- 3. должна быть установлена связь между временными рядами геодезических параметров, полученных с помощью системы контроля ГПЗ и соответствующими моделями геофизических процессов;
- 4. по мере появления новых измерительных технологий (типов измерений) они будут включены в систему контроля ГПЗ. Индивидуальные части (типы измерений) общей системы соединяются путем размещения различных инструментов на одной станции на Земле, на спутнике или на объекте. Это так называемая колокация (colocation) оборудования и датчиков весьма важна для согласованности и точности работы системы, чтобы она действовала как единый большой «инструмент». Каждая из применяемых технологий имеет свои слабые и сильные стороны и посредством колокации возможно использование сильных сторон одних технологий и смягчение недостатков других в целях создания максимально эффективной системы наблюдений. Например, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) является единственной геодезической технологией, способной определять небесную систему координат, осуществлять мониторинг прецессии и нутации Земли и ежедневный прямой контроль вращения Земли (UT1-UTC). В то же самое время, РСДБ технология нечувствительна к определению гравитационного поля Земли, которое определяется другими технологиями космической геодезии (ГНСС (Глобальные Навигационные Спутниковые Системы), лазерная локация спутников и Луны, система DORIS). Радиотехнические системы ГНСС, РСДБ и DORIS являются всепогодными системами, в то время как на работу лазерных систем сильное влияние оказывает облачный покров нашей планеты. Станции системы DORIS расположены равномерно на поверхности Земли, что делает данную систему высокоточным инструментом для контроля движения геоцентра.

Точности продуктов системы контроля ГПЗ, необходимые наиболее требовательным пользователям системы, выражаются следующими значениями [4]:



Рис. 1: Общая базисная схема построения системы контроля геодезических параметров Земли, основанная на рекомендациях проекта GGOS [4].

- небесная система координат: точность порядка 25 мкс дуги, стабильность порядка 3 мкс дуги/год;
- земная система координат: точность порядка 1 мм, стабильность порядка 0.1 мм/год, включая движение геоцентра; точность определения масштаба системы порядка 0.1·10<sup>-9</sup>, стабильность масштаба порядка 0.01·10<sup>-9</sup>/год;
- параметры ориентации Земли: точность порядка 1 мм с задержкой около 2 недель; точность порядка 3 мм в масштабе времени, близком к реальному, с суточным разрешением;
- статический геоид: точность порядка 1 мм, стабильность порядка 0.1 мм/год с пространственным разрешением 10 км;
- изменяющийся во времени геоид: точность порядка 1 мм, стабильность порядка 0.1 мм/год с пространственным разрешением 50 км и временным разрешением 10 дней.

Исходя из требований к точности, предъявляемых различными пользователями к продуктам системы контроля ГПЗ, задач, решаемых данной системой, а также технологий, с помощью которых могут быть получены высокоточные оценки фундаментальных геодезических параметров, логично предположить, что система контроля ГПЗ будет представлять из себя очень сложную систему с различными типами сенсоров и оборудования на Земле, околоземном воздушном пространстве и в космосе, которые интегрируются для формирования глобальной измерительной системы, проявляя себя как большой, всеобъемлющий «геодезический инструмент» для мониторинга земной системы. Система контроля ГПЗ должна охватывать не только глобальные наземные сети наблюдений и космические миссии, посвященные геодезическим и планетарным исследованиям, но также включать в себя коммуникационную инфраструктуру, центры анализа, координации и Интернет-ресурсы. Система контроля ГПЗ, в конечном счете, будет вырабатывать вполне определенные продукты для обеспечения метрологической основы наук о Земле, геоинформационных исследований, земной и планетарной навигации.

Следовательно, система контроля ГПЗ должна включать в себя следующие основные компоненты:

• измерительное оборудование: глобальные наземные сети наблюдений, земные и планетарные спутниковые миссии;

- инфраструктуру данных: передача данных, линии связи, системы управления и архивации данных, центры распространения данных и продуктов, веб-порталы;
- информационный портал: уникальную точку доступа для всех продуктов системы контроля ГПЗ с базой данных и соответствующие метаданные, совместимые с международными стандартами;
- анализ, моделирование и комбинирование данных: завершенные и согласованные процессы, охватывающие сбор и обработку измерительной информации огромного объема, согласованную интеграцию и ассимиляцию этих наблюдений в комплексные числовые модели Земной системы.

Основополагающая схема системы контроля ГПЗ, основанная на рекомендациях проекта GGOS (Global Geodetic Observing System) [4], приведена на рис. 1.

### 3. Заключение

В данной работе автором представлен общий вид предлагаемой системы контроля геодезических параметров Земли. При разработке данной схемы учтены рекомендации международной Глобальной Геодезической Системы Наблюдений (GGOS). В РФ работы по созданию системы контроля геодезических параметров Земли находятся на стадии становления, поэтому трудно сопоставить предложенную концепцию с разработками других авторов. Приведенная схема построения системы контроля ГПЗ основывается на реальных задачах, которые должны быть решены предлагаемой системой, а также на требованиях различных пользователей системы в областях точности, временных и пространственных разрешений, задержки получения продуктов.

### Список литературы

- 1. B. Luzum and G. Petit, Highlights of Astronomy, 16, 227, 2015.
- 2. Parametri Zemli 1990 goda (PZ-90.11),  $\mathit{Minoboroni},\,\mathbf{1},\,1,\,2014.$
- 3. V. P. Gorobets, G. V. Demianov, A. N. Mayorov, and G. G. Pobedinskyi, Geoprophi, 6, 4, 2013.
- 4. H.-P. Plag and M. Perlman, Global Geodetic Observing System, 1–332, 2009.

# Координаты и орбита кометы 21Р/Джакобини-Циннера по наблюдениям в обсерваториях Таджикистана

Кохирова Г.И., Буриев А.М., Хамроев У.Х.

Институт астрофизики Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Республика Таджикистан

В Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) и Гиссарской астрономической обсерватории (ГисАО) Института астрофизики АН РТ в 2018 г. проведены квазисинхронные астрометрические наблюдения короткопериодической кометы 21Р/Джакобини-Циннера. Определены координаты кометы и вычислена орбита. Результаты наблюдений в МАОС и ГисАО находятся в хорошем соответствии между собой, а также с данными мировых наблюдений. Сделано заключение о стабильности орбиты кометы на момент наблюдений. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

### Positions and orbit of comet 21P/Giacobini-Zinner from observations in Tajikistan

Kokhirova G.I., Buriev A.M., Khamroev U.Kh.

Institute of Astrophysics, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan

Quasisynchronous astrometric observations of short-period comet 21P/Giacobini-Zinner were carried out at the Sanglokh International Astronomical Observatory (IAOS) and the Gissar Astronomical Observatory (GisAO) of the Institute of Astrophysics of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, in 2018. The coordinates of comet were determined and the orbit was calculated. The results of observations in IAOS and GisAO are in satisfactory agreement with each other, as well as with available observations. The conclusion is made about the stability of the comet orbit during observation. Based on a talk presented at the XI International Conference "Near-Earth Astronomy and Space Heritage" (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

### **DOI:** 10.26087/INASAN.2020.5.3.011

### 1. Наблюдения кометы 21Р/Джакобини-Циннера, астрометрическая обработка, результаты

Комета 21Р/Джакобини-Циннера с периодом обращения 6.6 лет впервые была открыта в 1900 г. и вновь переоткрыта в 1913 г. Комета известна благодаря многочисленным вспышкам яркости и поэтому изучение ее активности, в том числе динамических свойств в период активности, остается актуальной задачей<sup>1</sup>. Очередное прохождение перигелия кометой 21Р/Джакобини-Циннера произошло 12 сентября 2018 г., кроме того, в этот период состоялось сближение кометы с Землей<sup>2</sup>. В этой связи сложились благоприятные условия для наблюдений кометы. 28 июня – 11 августа 2018 г. нами проведены квазисинхронные астрометрические наблюдения на телескопе Цейсс-1000 Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) и телескопе АЗТ-8 Гиссарской астрономической обсерватории (ГисАО) Института астрофизики АН РТ. Регистрация объекта выполнялась с помощью ПЗС-камеры серии ProLine с использованием широкополосных фотометрических фильтров системы Джонсона-Козинса — BVRI, при этом экспозиции составляли от 5 до 60 секунд. Для уменьшения уровня шумов ПЗС камеры аппаратура была охлаждена до температуры  $-20^{\circ}$ C. Чтобы учесть темновой сигнал в течение наблюдательной ночи были получены кадры dark (темновой ток), которые при обработке вычитались из рабочих кадров. Для выравнивания яркости на кадрах были использованы кадры flat («плоские» поля), полученные при вечерних или утренних сумерках. Для учета ошибок матрицы ПЗС-камеры снимались кадры bias, которые также использовались в калибровке кадров. Во время наблюдений в МАОС и ГисАО было получено около 400 изображений объекта. Положение орбиты кометы во время мониторинга и детали выполненных экспозиций приведены в табл. 1, где r и  $\Delta$ расстояния кометы от Солнца и от Земли, *ph* — фазовый угол, *N* и *t* — количество и время экспозиций.

Астрометрическая обработка кадров проведена с помощью программного пакета АПЕКС II [1]. Изображение кометы во время наблюдений приведено на рис. 1.

Экваториальные координаты кометы, полученные в результате астрометрической обработки наблюдений МАОС и ГисАО, приведены на рис. 2, где по оси абсцисс даны прямое восхождение  $\alpha$  и по оси ординат — склонение  $\delta$ . На рис. 3 приведена траектория по наблюдениям МАОС, ГисАО и данным МРС. В табл. 2 представлены средние значения отклонений экваториальных координат кометы, измеренных по наблюдениям (O) от вычисленных данных (C), обозначенные как (O - C) $_{\alpha}$  и (O - C) $_{\delta}$  для координат  $\alpha$  и  $\delta$ , соответственно, а также их средние квадратичные ошибки  $\sigma_{\alpha}$  и  $\sigma_{\delta}$  в угловых секундах по наблюдениям

<sup>1</sup>https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>https://web.archive.org/web/20170211235625/http://aworlds.com:80/clubs/88 samye-jarkie-izvestnye-komety-blizhaishi.html

Дата	r,	$\Delta$ ,	ph,	$N \times d$	рильтр	t,
2018	a.e.	a.e.	град.	MAOC	ГисАО	с
29.06	1.42	0.86	45.08	$\begin{array}{l} 30\times \ \mathrm{B}, \ 30\times \ \mathrm{V} \\ 30\times \ \mathrm{R}, \ 30\times \ \mathrm{I} \end{array}$	_	15-60
30.06	1.41	0.85	45.47	_	$30 \times B, 30 \times V$ $30 \times R, 30 \times I$	5-60
1.07	1.40	0.84	45.87	_	$30 \times B, 30 \times V$ $30 \times R, 30 \times I$	5-60
2.07	1.39	0.83	46.28	_	$\begin{array}{l} 30 \times \ \mathrm{B}, \ 30 \times \ \mathrm{V} \\ 30 \times \ \mathrm{R}, \ 30 \times \ \mathrm{I} \end{array}$	5–60
23.07	1.22	0.65	56.14	$\begin{array}{l} 24 \times \ \mathrm{B}, \ 24 \times \ \mathrm{V} \\ 24 \times \ \mathrm{R}, \ 24 \times \ \mathrm{I} \end{array}$	_	15-30
24.07	1.21	0.65	56.67	$\begin{array}{l} 29 \times \ \mathrm{B}, \ 29 \times \ \mathrm{V} \\ 29 \times \ \mathrm{R}, \ 29 \times \ \mathrm{I} \end{array}$	_	15-30
8.08	1.11	0.53	65.12	_	$\begin{array}{l} 29 \times \ \mathrm{B}, \ 29 \times \ \mathrm{V} \\ 29 \times \ \mathrm{R}, \ 29 \times \ \mathrm{I} \end{array}$	5-60
9.08	1.10	0.53	65.70	_	$\begin{array}{l} 22 \times \ \mathrm{B},  17 \times \ \mathrm{V} \\ 22 \times \ \mathrm{R},  22 \times \ \mathrm{I} \end{array}$	5-60
10.08	1.10	0.52	66.28	-	$\begin{array}{c} 22 \times \mathrm{B},  22 \times \mathrm{V} \\ 22 \times \mathrm{R},  22 \times \mathrm{I} \end{array}$	5-60
11.08	1.09	0.51	66.86	_	$22 \times B, 22 \times V$ $22 \times R, 22 \times I$	5-60

Таблица 1: Сводка наблюдений кометы 21Р/Джакобини-Циннера в МАОС и ГисАО



Рис. 1: Изображение кометы 21Р/Джакобини-Циннера: 24 июля 2018 г., телескоп Цейсс-1000 МАОС, экспозиция 60 сек (слева), 11 августа 2018 г., телескоп АЗТ-8 ГисАО экспозиция 30 сек (справа).



Рис. 2: Видимая тра<br/>ектория кометы 21Р/Джакобини-Циннера по наблюдениям в обсерваториях МАОС <br/>и ГисАО.

Дата	$(O-C)''_{\alpha},$	$\sigma''_{\alpha}$ ,	$(O-C)_{\delta}^{\prime\prime},$	$\sigma_{\delta}^{\prime\prime},$
29.06.2018	-0.014	0.008	0.051	0.033
30.06.2018	-0.018	0.004	-0.044	0.082
01.07.2018	-0.088	0.068	-0.038	0.095
02.07.2018	0.147	0.085	-0.185	0.098
23.07.2018	-0.043	0.067	0.075	0.070
24.07.2018	-0.095	0.029	0.089	0.099
08.08.2018	-0.186	0.079	-0.043	0.035
09.08.2018	-0.184	0.020	-0.085	0.009
10.08.2018	-0.156	0.032	-0.102	0.021
11.08.2018	-0.155	0.073	-0.108	0.028

Таблица 2: Точность наблюдений кометы 21Р/Джакобини-Ценнера в обсерватории Санглох и ГисАО



Рис. 3: Видимая траектория кометы 21Р/Джакобини-Циннера по наблюдениям в МАОС, ГисАО и данным MPC.

в МАОС и ГисАО. Как видно из табл. 2, по всем кадрам ошибка астрометрической редукции за весь период наблюдений не превышает 0.01'' и 0.09'' для прямого восхождения  $\alpha$  и склонения  $\delta$ , соответственно.

На основе найденных из наблюдений координат с помощью программы ЭПОС-9 [2] вычислена орбита кометы. Результаты представлены в табл. 3, где для сравнения также дана орбита, найденная по наблюдениям, собранным в Международном центре малых планет (MPC) [3]. В табл. 3 наряду с обычными элементами также даны T — время прохождения перигелия в юлианских днях (JD), эпоха, на которую орбита вычислена, n — среднее движение кометы, P — период обращения,  $\sigma$  — среднеквадратичная ошибка в угловых секундах.

Анализ результатов астрометрии показывает достаточно хорошую точность определения координат из наблюдений в MAOC и ГисАО и их хорошее соответствие с данными мирового мониторинга. Элементы орбиты, вычисленные по найденным из наблюдений MAOC и ГисАО координатам, являются идентичными, что также свидетельствует о приемлемой точности наблюдений. Схожесть вычисленных орбит с орбитой MPC позволяет предположить о стабильности орбиты кометы в период прохождения перигелия.

Элементы орбиты	MAOC	ГисАО	[3]
	[данная работа]	[данная работа]	
Кол-во положений,			
использованное			
для вычисления			
орбиты	241	412	2292
T	10 сентября 2018	10 сентября 2018	10 сентября 2018
	JD 2458371.61	JD 2454953.19	JD 2458371.77
Эпоха	25 июля 2018	25 июля 2018	23 марта 2018
	JD 2458324.5	JD 24578324.5	JD 2458200.5
e	$0.710455{\pm}0.00049$	$0.710454{\pm}0.00084$	0.710469
<i>a</i> , a.e.	$3.498443{\pm}0.00011$	$3.498443{\pm}0.00016$	3.498446
q, a.e.	$1.012904{\pm}0.00069$	$1.012904 {\pm} {\pm} 0.00059$	1.012906
<i>i</i> , град.	$31.998005{\pm}0.00061$	$31.998005{\pm}0.00011$	31.998000
$\omega$ , град.	$172.850050{\pm}0.00012$	$172.850050{\pm}0.00058$	172.85143
$\Omega$ , град.	$195.39514{\pm}0.00010$	$195.39514{\pm}0.00011$	195.39511
n	$0.150645{\pm}0.00044$	$0.150645{\pm}0.00064$	0.150623
Р	7.02	7.02	6.54
σ	0".240	0".380	0".673

Таблица 3: Первоначальная орбита комет<br/>ы $21\mathrm{P}/\mathrm{Д}$ жакобини-Ценнера, вычисленная по наблюдениям МАОС, Гис<br/>AO и орбита MPC (J2000.0)

### 2. Заключение

В результате астрометрической обработки наблюдений кометы 21Р/Джакобини-Циннера в обсерваториях Института астрофизики АН РТ определены координаты, геоцентрическая траектория и орбита кометы, которые согласуются как между собой, так и с данными МРС. Сделано заключение о стабильности орбиты кометы в период наблюдений.

### Список литературы

1. A. V. Devyatkin, D. L. Gorshanov, V. V. Kouprianov, and I. A. Verestchagina, Solar System Research, 44, 68, 2010.

2. V. N. L'vov and S. D. Tsekmeister, Solar System Research, 46, 177, 2012.

3. G. V. Williams, Minor Planet Electronic Circulars, Q24, 2018.

# Результаты наблюдений кометы 29Р/Швассмана-Вахмана 1 в обсерватории Санглох

Кохирова Г.И.<sup>1</sup>, Иванова А.В.<sup>2</sup>, Буриев А.М.<sup>1</sup>, Хамроев У.Х.<sup>1</sup>, Рахматуллаева Ф.Дж.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт астрофизики Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Республика Таджикистан, <sup>2</sup> Астрономический институт Словацкой Академии наук, Татранска Ломница, Словацкая Республика

В Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) Института астрофизики АН РТ проведены астрометрические и фотометрические наблюдения кометы 29Р/Швассмана-Вахмана 1 в 2017 г. Несмотря на короткий период обращения, эта комета относится к относительно новой группе малых тел, называемых кентаврами. Определены координаты кометы и вычислена орбита, получены значения блеска в фильтрах BVRI, проведена оценка диаметра ядра кометы. Результаты наблюдений в МАОС хорошо согласуются с данными мировых наблюдений. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

### Results of observations of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 in Sanglokh observatory

Kokhirova G.I.<sup>1</sup>, Ivanova O.V.<sup>2</sup>, Buriev A.M.<sup>1</sup>, Khamroev U.Kh.<sup>1</sup>, Rakhmatullaeva F.J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Astrophysics, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan, <sup>2</sup>Astronomical Institute of the Slovak Academy of Sciences, Tatranska Lomnica, Slovak Republic

In the International Astronomical Observatory Sanglokh of the Institute of Astrophysics of the AS RT astrometric and photometric observations of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 were carried out in 2017. In spite of short period the comet is classified as Centaurs group object. The coordinates of comet were determined and the orbit was calculated, apparent and absolute magnitudes in BVRI bands were found as well the diameter of comet nucleus was estimated. The results of observations in the Sanglokh observatory are in good agreement with the data of world observations. Based on a talk presented at the XI International Conference "Near-Earth Astronomy and Space Heritage" (Sep 30 - Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

**DOI:** 10.26087/INASAN.2020.5.3.012

### 1. Введение

Короткопериодическая комета 29Р/Швассмана-Вахмана 1 была открыта в 1927 г. в Германии. Элементы орбиты кометы приведены в табл. 1, где a — большая полуось, e — эксцентриситет, q и Q — перигелийное и афелийное расстояния, i — наклонение,  $\omega$  — аргумент перигелия,  $\Omega$  — долгота перигелия (по данным JPL Small-Body Database<sup>1</sup>).

После выявления нового класса малых тел, названных кентаврами, у которых и перигелийное расстояние q и большая полуось a орбит расположены между орбитами Юпитера и Нептуна [1], то оказалось, что указанные параметры орбиты кометы 29Р удовлетворяют этому условию, и поэтому комета была отнесена к группе кентавров [2]. Отметим, что этим объектам также свойственны хаотические орбиты [1]. Двойственность кометы связана с очень малым значением эксцентриситета, вследствие чего она двигается вокруг Солнца по почти круговой орбите, нехарактерной для комет — такие орбиты обычно имеют астероиды и планеты. Предполагается, что кентавры являются объектами, переброшенными из пояса Койпера во внутреннюю область планетной системы, где для наземных наблюдений они проявятся как короткопериодические кометы [3, 4, 5]. В этом смысле кентавры с научной точки зрения интересны как близкие, то есть более яркие и доступные для изучения образцы объектов пояса Койпера. О двойственности кометы говорят и ее физические свойства. Геометрическое альбедо кометы 29Р, найденное из фотометрии в видимом спектральном диапазоне, составляет  $p_V = 0.13$  [6], что совершенно нетипично для кометных ядер, для которых среднее значение альбедо составляет 0.07 [7]. В то же время эта величина альбедо свойственна объектам группы кентавров [8]. Вообще для альбедо кометы 29Р имеется несколько оценок от 0.02 до 0.17. С таким расхождением в значениях альбедо связан и большой разброс в имеющихся оценках эффективного размера ядра кометы 29Р. Различные оценки радиуса, найденные в предположении альбедо p = 0.04, заключены в пределах от 21 до 52 км [9]. Период вращения ядра оценен как 11.7–12.1 ч [10]. Согласно базе данных JPL Small-Body Database, общая абсолютная яркость кометы составляет  $M1 = 5.9^{\rm m}$ , p = 0.033и диаметр d = 30.8 км. С момента открытия комета 29Р стала известной своими многочисленными постоянными вспышками, то есть внезапным резким увеличением яркости кометы на 2–5 зв. вел. [11, 12]. Вопрос об активности кометы 29Р до сих пор является открытым.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi

Таблица 1: Элементы орбиты кометы 29Р/Швассмана-Вахмана 1 (J2000.0)

Эпоха	<i>a</i> , a.e.	e	q, a.e.	Q, a.e.	<i>i</i> , град.	$\omega$ , град.	$\Omega$ ,град.
19.01.2010	5.989	0.045	5.719	6.259	9.393	48.802	312.634

Таблица 2: Сводка наблюдений кометы 29Р/Швассмана-Вахмана 1 в обсерватории Санглох

Дата	r,	$\Delta$ ,	PA,	ph,	$N \times \Phi$ ильтр	t,
	a.e.	a.e.	град.	град.		с
28.07.2017	5.829	4.842	67.6	2.583	$10 \times V, 20 \times R, 10 \times I$	60
29.07.2017	5.828	4.838	67.2	2.403	$8 \text{xV}, 11 \times \text{R}, 11 \times \text{I}$	60
30.07.2017	5.828	4.834	66.8	2.223	$30 \text{xB}, 33 \times \text{V}, 30 \times \text{R}, 30 \times \text{I}$	60
31.07.2017	5.828	4.831	66.2	2.042	40xB, 40× V, 40× R, 40× I	60
01.08.2017	5.828	4.828	65.7	1.860	$20 \text{xB}, 20 \times \text{V}, 20 \times \text{R}, 20 \times \text{I}$	60

Таблица 3: Точность наблюдений кометы 29Р/Швассмана-Вахмана 1 в обсерватории Санглох

Дата	$(O-C)_{\alpha}^{\prime\prime}$	$\sigma_{lpha}''$	$(O-C)_{\delta}^{\prime\prime}$	$\sigma_{\delta}''$
28.07. 2017	-0.023	0.018	0.073	0.038
29.07. 2017	-0.062	0.026	0.071	0.015
30.07. 2017	-0.063	0.025	0.086	0.019
31.07. 2017	-0.080	0.044	0.093	0.034
01.08. 2017	-0.056	0.016	0.035	0.019

### 2. Наблюдения кометы 29Р/Швассмана-Вахмана 1

В 2017 г. комета 29Р/Швассмана-Вахмана 1 в очередной раз проявила активность и стала доступной для наблюдений. 28 июля – 1 августа 2017 г. нами были проведены наблюдения кометы 29Р на телескопе Цейсс-1000 Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) Института астрофизики АН РТ. Регистрация объекта выполнялась с помощью ПЗС-камеры FLI 16803 серии ProLine с использованием пирокополосных фильтров BVRI фотометрической системы Джонсона-Козинса, при этом экспозиции составляли 60 секунд. Положение орбиты кометы во время мониторинга и детали выполненных экспозиций приведены в табл. 2, где r и  $\Delta$  — расстояния кометы от Солнца и Земли, PA — позиционный угол направления на Солнце, ph — фазовый угол, N и t — количество и время экспозиций.

### 3. Астрометрическая обработка

Астрометрическая и фотометрическая обработка кадров проведена с помощью программного пакета АПЕКС II [13]. Изображение кометы во время наблюдений приведено на рис. 1. Экваториальные координаты кометы, найденные в результате астрометрической обработки наблюдений МАОС [14], приведены в виде графика на рис. 2, где по оси абсцисс даны прямое восхождение  $\alpha$  и по оси ординат — склонение  $\delta$ . В табл. 3 представлены средние значения отклонений экваториальных координат кометы, измеренных по наблюдениям (O) от вычисленных данных (C), обозначенные как (O - C) $_{\alpha}$  и (O - C) $_{\delta}$  для координат  $\alpha$ и  $\delta$ , соответственно, а также их средние квадратичные опшбки  $\sigma_{\alpha}$  и  $\sigma_{\delta}$  в угловых секундах по наблюдениям в МАОС. Как видно из табл. 3, средняя по всем кадрам опшбка астрометрической редукции за весь период наблюдений не превышает 0.04" и 0.09" для прямого восхождения  $\alpha$  и склонения  $\delta$ , соответственно.

На основе найденных из наблюдений координат с помощью программы ЭПОС-9 [15] вычислена орбита кометы. Результаты представлены в табл. 4, где для сравнения также дана орбита, найденная по наблюдениям, собранным в Международном центре малых планет (MPC) [16]. В табл. 4 наряду с обычными элементами также даны T — время прохождения перигелия в юлианских днях (JD), эпоха, на которую орбита вычис-



Рис. 1: Изображение кометы 29Р в фильтре *R*, полученное 30 июля 2017 г., телескоп Цейсс-1000 МАОС, экспозиция 60 сек.



Рис. 2: Видимая траектория кометы 29Р/Швассмана-Вахмана 1 по наблюдениям в обсерватории Санглох.

лена, n — среднее движение кометы, P — период обращения,  $\sigma$  — среднеквадратичная ошибка в угловых секундах. Как видно, по наблюдениям в МАОС получена вполне узнаваемая орбита кометы.

Элементы орбиты	МАОС [данная работа],	MPEC2016 -V116 [16]	χ
Кол-во положений,			
использованное для			
вычисления			
орбиты	300	20553	_
T (JD)	2458564.1256	2458567.2912	_
Эпоха (JD)	2457820.5	2457600.5	_
e	$0.0417716{\pm}0.00023$	0.0416442	0.0001274
<i>a</i> , a.e.	$6.016222{\pm}0.00014$	6.0151515	0.00107031
<i>q</i> , a.e.	$5.764914{\pm}0.00010$	5.7646555	0.00025873
і, град.	$9.374445 {\pm} 0.00060$	9.37658	-0.00214
$\omega$ , град.	$48.758930 {\pm} 0.00021$	48.98332	-0.22439
Ω, град.	$312.409930 \pm 0.00010$	312.40927	0.00066
n, град./сут.	$0.066792{\pm}0.00011$	0.06680885	-0.00000178
σ	0".288	0".600	

Таблица 4: Первоначальная орбита кометы 29Р/Швассмана-Вахмана 1, полученная по наблюдениям обсерватории Санглох, и орбита МРС (J2000.0)

Таблица 5: Видимые звездные величины кометы 29Р по наблюдениям в МАОС

Фильтр	28.07.2017	29.07.2017	30.07.2017	31.07.2017	01.08.2017
В	_	_	$17.78 {\pm} 0.05$	$17.77 {\pm} 0.02$	$17.75 {\pm} 0.04$
V	$16.88 {\pm} 0.04$	$16.91 {\pm} 0.05$	$16.92 {\pm} 0.05$	$16.97 {\pm} 0.04$	$16.92 {\pm} 0.04$
R	$16.29 {\pm} 0.04$	$16.41 {\pm} 0.04$	$16.45 {\pm} 0.05$	$16.50 {\pm} 0.04$	$16.33 {\pm} 0.04$
Ι	$15.69 {\pm} 0.03$	$15.83 {\pm} 0.05$	$15.92{\pm}0.05$	$16.05 {\pm} 0.02$	$15.82 {\pm} 0.04$

### 4. Фотометрическая обработка

Фотометрическая обработка выполнена по стандартной процедуре. Для определения видимого блеска кометы использовались звезды сравнения из каталога APASS, для которых блеск определен с точностью, равной 0.03<sup>m</sup>. Кривые блеска кометы 29Р/Швассмана-Вахмана 1 представлены на рис. 3, где по оси ординат отложены видимые звездные величины в фильтрах BVRI и по оси абсцисс — даты наблюдений в юлианских днях. Средние значения видимых звездных величин объекта, полученные в разных фильтрах, для каждой ночи наблюдений даны в табл. 5.

Видимый блеск та конвертировался в абсолютную звездную величину ядра кометы  $m_a(1,1,0)$  с использованием следующего эмпирического уравнения 1 [17]

$$m_a(1,1,0) = m_a - 5\log(r\Delta) - \beta\alpha(1) \tag{1}$$

Таблица 6: Абсолютные звездные величины  $m_a(1,1,0)$  кометы 29Р по наблюдениям в МАОС

Фильтр	28.07.2017	29.07.2017	30.07.2017	31.07.2017	01.08.2017
В	-	-	$10.45 {\pm} 0.05$	$10.45 {\pm} 0.02$	$10.45 {\pm} 0.02$
V	$9.54{\pm}0.04$	$9.57 {\pm} 0.05$	$9.60 {\pm} 0.05$	$9.65 {\pm} 0.03$	$9.61 {\pm} 0.04$
R	$8.95 {\pm} 0.04$	$9.07 {\pm} 0.04$	$9.13 {\pm} 0.04$	$9.18 {\pm} 0.04$	$9.01 {\pm} 0.02$
Ι	$8.19{\pm}0.03$	$8.50 {\pm} 0.04$	$8.59 {\pm} 0.04$	$8.73 {\pm} 0.02$	$8.51 {\pm} 0.04$



Рис. 3: Видимые звездные величины кометы 29Р в фильтрах BVRI по наблюдениям в MAOC с 28 июля по 1 августа 2017 г.

где  $m_a(1,1,0)$  (или H) — блеск гипотетической точки на единичном гелиоцентрическом и геоцентрическом расстояниях с фазовым углом  $ph = 0^{\circ}$ ,  $m_a$  — измеренный блеск, r и  $\Delta$  — гелио- и геоцентрическое расстояния кометы в а.е.,  $\beta$  — фазовый угло (ph) в градусах,  $\beta$  — фазовый коэффициент в звездных величинах на градус; индекс a означает какой-либо фильтр. Для фазового коэффициента использовано общепринятое значение  $\beta = 0.035$  зв. вел./град. [9]. Абсолютный блеск кометы, найденный по формуле (1), приведен в табл. 6, зависимость абсолютной яркости кометы, обозначенная на графике H, от даты наблюдений (в юлианских днях) в МАОС приведена на рис. 4. Как видно, в период мониторинга абсолютный блеск кометы практически был постоянным.

Для оценки размера ядра кометы использовано эмпирическое соотношение между измеренным в фильтре V видимым блеском  $m_{\rm V}$  и эффективным радиусом ядра кометы  $r_{\rm N}$  в метрах [18]

$$Ar_{\rm N}^2 = 2.238 \cdot 10^{22} R_b^2 \Delta^2 10^{0.4(m_{\odot} - m_{\rm V} + \beta\alpha)} \tag{2}$$



Рис. 4: Абсолютные звездные величины *H* (средние значения) кометы 29Р в фильтрах BVRI по наблюдениям в MAOC.

Дата	r,	$\Delta$ ,	ph,	$m_{\rm V}(1,1,0,),$	D,	D,
	a.e.	a.e.	град.	зв. вел.	KM	KM
					(A = 0.13)	(A = 0.033)
28.07.2017	5.829	4.842	2.583	$9.54{\pm}0.04$	$45.68{\pm}0.08$	$91.37{\pm}0.08$
29.07.2017	5.828	4.838	2.403	$9.57{\pm}0.05$	$44.89{\pm}0.08$	$89.78 {\pm} 0.08$
30.07.2017	5.828	4.834	2.223	$9.60{\pm}0.05$	$44.37 {\pm} 0.08$	$88.74 {\pm} 0.08$
31.07.2017	5.828	4.831	2.042	$9.65 \pm 0.03$	$43.34 \pm 0.08$	$86.68 {\pm} 0.08$
01.08.2017	5.828	4.828	1.860	$9.61{\pm}0.04$	$44.08 {\pm} 0.08$	$88.17 {\pm} 0.08$

Таблица 7: Оценка размера ядра кометы 29Р по наблюдениям в МАОС

где A — геометрическое альбедо и m = -26.75 видимый блеск Солнца, причем обе величины даны в фильтре V. Поскольку величина альбедо кометы 29Р точно не установлена, то для определения диаметра мы использовали два его значения 0.13 и 0.03. Результаты оценки диаметра ядра кометы приведены в табл. 7.

Как было отмечено, имеется оценка радиуса ядра (A = 0.04) в пределах от 21 до 52 км [9]. Оценка радиуса ядра (A = 0.13) согласно [6] составляет 20 км. По нашим измерениям, оценка диаметра заключена в пределах 43.3 – 45.7 км при A = 0.13 и 86.7 – 91.4 с A = 0.033, что вполне соответствует имеющимся данным. Для уточнения размера необходимо продолжить наблюдения кометы.

### 5. Заключение

По наблюдениям кометы 29Р в обсерватории Санглох определены координаты, геоцентрическая траектория и орбита кометы, которые согласуются с данными MPC. Найден видимый блеск кометы в фильтрах BVRI и построены кривые блеска по наблюдениям пяти ночей. Определен абсолютный блеск кометы в фильтрах BVRI, его зависимость от времени свидетельствует об отсутствии нерегулярностей в блеске кометы в период наблюдений. Значения диаметра ядра по нашим наблюдениям соответствуют имеющимся в литературе оценкам.

### Список литературы

- 1. B. L. Bailey and R. Malhotra, *Icarus*, 203, 155, 2009.
- 2. D. Jewitt and P. Kalas, *ApJL*, **499**, L103, 1998.
- 3. D. Jewitt and J. Luu, *Nature*, **362**, 730, 1993.
- 4. H. F. Levison and M. J. Duncan, *Icarus*, **127**, 13, 1997.
- 5. D. Jewitt, J. Luu, and C. Trujillo, AJ, **115**, 2125, 1998.

- 6. D. P. Cruikshank and R. H. Brown, *Icarus*, 56, 377, 1983.
- 7. D. Jewitt, IAU Colloq. 116: Comets in the post-Halley era, 19-65, 1991.
- 8. M. A. Barucci, A. Doressoundiram, and D. P. Cruikshank, Surface characteristics of transneptunian objects and centaurs from photometry and spectroscopy, 647 (2004).
- 9. P. L. Lamy, I. Toth, Y. R. Fernandez, and H. A. Weaver, in M. C. Festou, H. U. Keller, and H. A. Weaver, eds., *Comets II*, 223 (2004).
- A. V. Ivanova, V. L. Afanasiev, P. P. Korsun, A. R. Baranskii, M. V. Andreev, and V. A. Ponomarenko, Solar System Research, 46, 313, 2012.
- 11. F. L. Whipple, AJ, 85, 305, 1980.
- O. V. Ivanova, I. V. Luk'yanyk, N. N. Kiselev, V. L. Afanasiev, E. Picazzio, O. Cavichia, A. A. de Almeida, and S. M. Andrievsky, P&SS, 121, 10, 2016.
- 13. A. V. Devyatkin, D. L. Gorshanov, V. V. Kouprianov, and I. A. Verestchagina, Solar System Research, 44, 68, 2010.
- 14. G. I. Kokhirova, A. Ivanova, A. M. Buriev, U. K. Khamroev, A. A. Ibrohimov, A. S. Mullo-Abdolov, and F. D. Rakhmatullaeva, Mpec 2017-t14, 2017.
- 15. V. N. L'vov and S. D. Tsekmeister, Solar System Research, 46, 177, 2012.
- 16. G. V. Williams, Mpec 2016-v116, 2016.
- 17. C. Snodgrass, S. C. Lowry, and A. Fitzsimmons, *MNRAS*, **373**, 1590, 2006.
- 18. M. Solontoi, Ž. Ivezić, M. Jurić, A. C. Becker, et al., Icarus, 218, 571, 2012.

# Сверхбыстрая оценка лучевой скорости потенциально опасных для Земли астероидов методом дробного дифференцирования доплеровского сигнала

Бондарь Ю.А.<sup>1</sup>, Захарченко В.Д.<sup>1</sup>, Карликова И.А.<sup>1</sup>, Кивокурцева П.И.<sup>2</sup>, Коваленко И.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Рассмотрена реализация дробно-дифференцирующего фильтра (ДДФ) порядка 1/2 в виде аналоговой и цифровой структур. ДДФ позволяет существенно ускорить оценивание лучевой скорости движения космического объекта, что важно для решения практических задач противостояния астероидно-кометной угрозе. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

### Super-fast estimation of radial speeds of potentially hazardous for Earth asteroids by the method of a fractional differentiation of the doppler signal

Bondar Yu.A.<sup>1</sup>, Zakharchenko V.D.<sup>1</sup>, Karlikova I.A.<sup>1</sup>, Kivokurtseva P.I.<sup>2</sup>, Kovalenko I.G.<sup>1</sup>

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The implementation of a fractional-differentiating filter of order 1/2 in the form of analog and digital structures is considered. Such a filter allows one to significantly accelerate the estimation of the radial velocity of a space object, which is important for solving practical problems of confronting the asteroid-comet threat. Based on a talk presented at the XI International Conference "Near-Earth Astronomy and Space Heritage" (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.3.013

### 1. Введение

Защита от астероидно-кометной угрозы предполагает обнаружение опасных космических объектов, измерение параметров их движения, расчет траектории и их уничтожение, либо, по крайне мере, оперативное оповещение об опасности национальных служб по защите населения от чрезвычайных ситуаций на территории, подвергаемой угрозе. При определении координат космического объекта прежде всего необходим быстрый и точный прогноз его траектории. Такой прогноз производится по измерению скорости объекта на основе анализа доплеровского сдвига частоты отраженного радиолокационного сигнала. Повышение точности и оперативности измерения частоты доплеровского сигнала является необходимым условием эффективной работы радиолокационных систем космической защиты. В случае, когда различные точки объекта, формирующие отраженный сигнал, движутся с различными скоростями (например, при вращении объекта) отраженный сигнал может иметь широкий спектр доплеровских частот, соответствующий спектру скоростей отражающих точек на его поверхности [1]. В этом случае в качестве средней частоты в радиолокации используется центр тяжести энергетического спектра доплеровского сигнала, который остается устойчивой характеристикой, соответствующей движению центра масс движущегося объекта [2]. Ширина спектра доплеровского сигнала позволяет оценить скорость вращения и размеры небесного тела, а коэффициент асимметрии спектра дает возможность классифицировать объект по особенностям его формы (шарообразный, грушевидный, «снеговик» и проч.).

В теории сигналов для оценки частотных параметров спектра широко используется метод спектральных моментов [3], в соответствии с которым средняя частота и эффективная ширина спектра сигнала на положительной полуоси частот определяется как центр тяжести спектра (ЦТС)  $\omega_0$  и удвоенный радиус инерции  $2\Delta\omega$  энергетического спектра сигнала  $E(\omega) = |S(\omega)|^2$  (см. рис. 1). Здесь  $S(\omega) = \mathbb{F}[x(t)]$  — спектральная плотность амплитуды сигнала x(t), ограниченного интервалом наблюдения  $t \in [0, T]$ . Соответствующие моменты энергетического спектра определяются с помощью функции распределения  $W(\omega) = E(\omega) / \int_0^{\infty} E(\omega) d\omega$ , имеющей смысл плотности распределения частоты в спектре сигнала, по которой ведется усреднение.

При этом параметры распределения  $W(\omega)$  определяются следующим образом:  $\omega_0 = \langle \omega \rangle$  — первый начальный момент распределения  $W(\omega)$ , имеет смысл центра тяжести энергетического спектра;  $\langle \omega^2 \rangle$  — второй начальный момент распределения; ширина спектра  $2\Delta\omega$  определяется как удвоенное среднеквадратическое отклонение частоты от среднего значения:

$$\omega_0 = \langle \omega \rangle = \int_0^\infty \omega W(\omega) d\omega, \quad \langle \omega^2 \rangle = \int_0^\infty \omega^2 W(\omega) d\omega, \quad \Delta \omega = \sqrt{\langle \omega^2 \rangle - \omega_0^2}. \tag{1}$$

Научные труды ИНАСАН, 2020, том 5, выпуск 3

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Volgograd State University, Volgograd, Russia



Рис. 1: К определению «центра тяжести»  $\omega_0$  и ширины  $2\Delta\omega$  спектра доплеровского сигнала x(t) по методу моментов.



Рис. 2: Структура аналогового (слева) и цифрового (справа) фильтров, реализующих дробное дифференцирование сигнала (производная порядка 1/2).

Учитывая особую важность оценки скорости небесного объекта, обусловленную необходимостью точного прогноза его траектории, в дальнейшем ограничимся рассмотрением процедуры быстрой оценки средней частоты доплероского сигнала  $\omega_0$ .

### 2. Оценка центра распределения $W(\omega)$ во временной области с использованием алгоритма дробного дифференцирования сигнала

Расчет энергетического спектра  $E(\omega)$  и его моментов аппаратно-программным методом с использованием алгоритмов дискретного преобразования Фурье непосредственно по соотношениям (1) налагает высокие требования к скорости и объему вычислений при реализации обработки в частотной области, поскольку для получения спектральных оценок необходимо значительное время обработки отсчетов сигнала по истечении интервала наблюдения. Одним из авторов настоящей работы была выдвинута идея о том, что начальный момент распределения  $W(\omega)$  может вычисляться в режиме реального времени по мере поступления сигнала [4]:

$$\omega_0 = \frac{\|D^{1/2}x(t)\|^2}{\|x(t)\|^2} = \frac{\int_0^\infty \left[D^{1/2}x(t)\right]^2 dt}{\int_0^\infty \left[x(t)\right]^2 dt}.$$
(2)

Выражение (2) позволяет формировать оценку величины  $\omega_0$  без спектральной обработки по мере прихода отраженного целью сигнала и получить ее к концу интервала наблюдения T. При этом соответствующий алгоритм обработки сигнала x(t) должен содержать блок дробного дифференцирования порядка 1/2, также работающий в режиме реального времени — линейный фильтр.

При практической реализации алгоритма дробного дифференцирования порядка 1/2 при помощи аналогового фильтра могут использоваться простейшие элементы автоматики — апериодические звенья первого


Рис. 3: Вид модельного сигнала.

порядка, импульсные характеристики которых выражаются затухающими экспонентами. Параметры экспонент  $T_k$  (их характерные времена затухания) рассчитываются для наилучшей аппроксимации импульсной характеристики фильтра с помощью квадратуры наивысшей степени точности (КНСТ) [5]. Структура алгоритма работы аналогового фильтра представлена на рис. 2 слева. Вариант схемной реализации алгоритма (рис. 3) в виде аналогового ДДФ порядка 1/2 приведен в патенте авторов [6]. На рис. 2 справа приведена структура цифрового фильтра, реализующего дискретный алгоритм дробного дифференцирования цифрового сигнала x(k), которая содержит N параллельных рекурсивных звеньев первого порядка [7].

## 3. Квадратура наивысшей степени точности для расчета дробной производной порядка 1/2

Для быстрого расчета дробной производной Римана-Лиувилля порядка 1/2 сигнала x(t) приходится вычислять интеграл вида

$$I = \int_0^T (t+\varepsilon)^{-3/2} x(t) dt, \qquad (3)$$

который, как показано в работах [1, 5], дает основной вклад в расчет дробной производной, представленной в виде интеграла Дюамеля. Здесь  $\varepsilon$  — время задержки фильтра (характерная величина задержки составляет ~ 1 мкс). Ключевые требования к работе цифрового ДДФ — максимальные оперативность и точность расчетов. Первое можно обеспечить, если использовать минимально необходимое число отсчетов сигнала, второе — если для заданного числа отсчетов применить КНСТ для вычисления (3). Нами построена такая КНСТ, которая позволяет единообразно вычислять интеграл для произвольной длительности T, в том числе для полубесконечного интервала  $T \to \infty$ . Последнее необходимо, поскольку продолжительность отраженного сигнала T, которая, хотя и коррелирует с продолжительностью зондирующего сигнала, в точности не известна из-за того, что трасса радиосигнала проходит по космической плазме, что влечет дисперсионное расплывание сигнала и увеличение его длительности.

Узлы и веса КНСТ обычно находятся по системе ортогональных полиномов. Преобразование  $d(z + \text{const}) = (t + \varepsilon)^{-3/2} dt$  позволяет свести (3) к интегралу для новой переменной z на отрезке [-1,1] с единичной весовой функцией. Для такого интеграла КНСТ строится с помощью полиномов Лежандра  $P_n(z)$ . Возвращаясь назад к переменной t с помощью обратного преобразования, находим набор ортогональных функций  $Q_n(t)$  как систему растянутых полиномов Лежандра.

В качестве примера сигнала x(t) в модельных расчетах использовался широкополосный радиоимпульс с гауссовой огибающей (рис. 3), характерный для задач радиолокационного зондирования:

$$x(t) = A_0 e^{-\alpha (t - \frac{T}{5})^2} \cos\left(\omega_0 \left[t - \frac{T}{5}\right]\right),\tag{4}$$

где  $A_0 = 1.0$ ,  $\alpha = 100.0$ ,  $\omega_0 = 2\pi F_0$ ,  $F_0 = 32.0$  [Гц] — несущая частота. На интервале  $t \in [0, 1]$  длительностью 1 [c] задается  $N_s = 2^{17} = 131072$  эквидистантных отсчетов с шагом  $\delta = 1/N_s$ . Длительность сигнала по основанию составляет ~ 0.35 [c]. Шаг дискретизации (эквидистантно) по Котельникову не должен превышать

		N, узлов		
	32	64	128	131072
$\Delta_N \{ \text{KHCT} \}$	669.13	0.035099	$2.2861 \cdot 10^{-16}$	_
$\Delta_N{\Pi}$	_	_	_	$5.8879 \cdot 10^{-8}$

Таблица 1: Относительная точность  $\Delta_N = |I - I_N|/|I|$  вычисления интеграла (3) для разного количества N узлов квадратурных формул наивысшей степени точности (КНСТ) и по схеме прямоугольников (П).

 $\Delta T = 1/(2F_0) = 0.015625$  [c]. Время задержки фильтра  $\varepsilon$  выбрано равным  $10^{-6}$  [c]. Расчеты проводились для числа узлов КНСТ N = 32, 64, 128, 256 в арифметике с двойной точностью. Результаты для относительной погрешности вычисления интеграла по КНСТ  $I_N$  по сравнению с «точным» значением I, найденным также численно, но с гарантированно верными всеми значащими цифрами. Для сравнения приведена относительная погрешность расчета интеграла по центрированной схеме прямоугольников с  $N = N_s = 131072$  узлами. Видно, что уже начиная с границы допустимого разрешения по Котельникову (N = 64) точность вычисления интеграла по КНСТ оказывается приемлемой, а при увеличении разрешения вдвое (N = 128) — вполне достаточной для абсолютного большинства практических задач.

#### 4. Заключение

Таким образом показано, что положение центра тяжести и другие параметры спектра доплеровского сигнала можно определять в реальном масштабе времени без спектральной обработки. Предлагаемые алгоритмы допускают сравнительно простую техническую реализацию на основе широко распространенных структур. Использование квадратуры наивысшей степени точности позволяет построить алгоритмы дробного дифференцирования, обеспечивающие точность, необходимую для решения практических задач защиты от AKO.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области (проект 19-47-340005-р\_поволжье\_а).

#### Список литературы

- 1. V. Zakharchenko and I. Kovalenko, Acta Astronaut., 98, 158, 2014.
- 2. L. E. Franks, Signal Theory (Prentice Hall, 1969).
- 3. B. A. Atayants and V. S. Parshin, Radioelektronika, 26, 55, 1983.
- V. D. Zakharchenko, Sposob otsenki sredney chastoty shirokopolosnykh doplerovskikh signalov, Patent na izobreteniye (RF) №2114440. Opubl. 27.06.1998. Izobreteniya. Zayavki i patenty, 1998.
- 5. V. D. Zakharchenko and I. G. Kovalenko, Mathematics, 6, 1, 2018.
- 6. V. Zakharchenko, E. Verstakov, and I. Kovalenko, Drobno-differentsiruyushchiy elektricheskiy fil'tr poryadka 1/2 po metodu Proni, Patent na izobreteniye (RF) №2645445 ot 26.02.2015. Byull. №6, 2018.
- 7. L. Rabiner and B. Gold, Theory and application of digital signal processing (Prentice-Hall, 1975).

### Бассейн «Южный Полюс — Эйткен» от первых измерений («Зонд-6», 1968) до первой посадки лунохода («Чанъ'э-4», 2019)

Шпекин М.И.

Казанский федеральный университет, Казань, Россия

Рассмотрены основные этапы изучения бассейна «Южный Полюс — Эйткен» на Луне, начиная с первых прямых измерений рельефа его поверхности в Советском Союзе до первой успешной посадки на его территории Китайской межпланетной станции «Чанъ'э-4». Представлены результаты фотограмметрии обратной стороны Луны по снимкам, впервые доставленным на Землю космическими кораблями «Зонд-6» и «Зонд-8» в 1968 и 1970 гг. Перечислены некоторые публикации отечественных и зарубежных исследователей, посвященные изучению бассейна в первую очередь в ГАИШ МГУ и в университете Брауна (США, Род-Айленд). Обращается внимание на высокий уровень подготовки миссии «Чанъ'э-4» китайскими учеными и инженерами. Впервые за 60 лет космических исследований Луны им удалось осуществить мягкую посадку на ее обратной стороне в кратере Карман, где они уже второй год проводят интересные эксперименты. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

# "South Pole — Aitken" basin from first measurements ("Zond-6", 1968) to first landing of the lunar rover ("Chang'e-4", 2019)

Shpekin M.I.

Kazan Federal University, Kazan, Russia

The main stages of studying the "South Pole — Aitken" basin on the Moon are considered, starting with the first direct measurements of the surface topography in the Soviet Union until the first successful landing of the "Chang'e-4" Chinese interplanetary station on its territory. The results of photogrammetry of the far side of the Moon from the images first delivered to Earth by the spacecraft "Zond-6" and "Zond-8" in 1968 and 1970 are presented. Some publications of domestic and foreign researchers on the study of the basin are listed primarily in the SAI MSU and Brown University (USA, Rhode Island). Attention is drawn to the high level of training of the "Chang'e-4" mission by Chinese scientists and engineers. For the first time in 60 years of space exploration of the Moon, they were able to make a soft landing on its reverse side in the Van-Karman crater, where for the second year they have been conducting a series of interesting scientific experiments. Based on a talk presented at the XI International Conference "Near-Earth Astronomy and Space Heritage" (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

**DOI:** 10.26087/INASAN.2020.5.3.014

#### 1. Введение

Вспомнить историю открытия и изучения бассейна интересно именно сегодня, когда на его территории работает управляемая с Земли китайская исследовательская станция «Чанъ'э-4». Впервые в истории лунных исследований космический аппарат успешно прилунился на обратной стороне Луны и приступил к выполнению научной программы. Успешная посадка на дно бассейна сопровождалась созданием так называемого «Сорочьего моста», который через дальнюю точку Лагранжа связал обратную сторону Луны с Землей. Подобный мост создан впервые в практике космических исследований и открывает новые перспективы в изучении Луны.

## 2. Советские космические корабли «Зонд-6» и «Зонд-8» и открытие низменности на обратной стороне Луны

Первые измерения рельефа в районе бассейна ЮПЭ были опубликованы в Институте космических исследований АН СССР в 1970 г. [1]. Авторы этой первой публикации обнаружили на снимках космического корабля (KK) «Зонд-6» (1968) обширную ранее неизвестную депрессию на обратной стороне Луны и назвали ее низменность Юго-Западная [1, 2, 3]. Спускаемый аппарат «Зонда-6» приземлился в нештатной ситуации, и фотопленка с лунными снимками была частично повреждена. По этой причине у авторов [1, 2, 3] оставались сомнения в надежности полученных результатов. Тем более, что к тому времени среди специалистов сложилось уверенное представление о том, что практически вся обратная сторона Луны покрыта горами и на ней нет морских территорий подобных тем, что есть на видимой стороне. Поэтому большие надежды возлагались на фотопленку, успешно доставленную на Землю кораблем «Зонд-8» в 1970 г. На этот раз качество снимков оказалось безупречным. Фотограмметрические измерения новых снимков полностью подтвердили наличие общирной низменности на обратной стороне Луны [4, 5]. Подробный высотный профиль, построенный при непосредственном участии автора настоящей статьи, представлен на рис. 1. В табл. 1 показаны высотные отметки в районе вышеназванной низменности для 7 характерных точек рельефа. При этом, как



Рис. 1: Высотный профиль обратной стороны Луны в сечении, перпендикулярном видимому с Земли (слева), и увеличенный фрагмент профиля, включающий низменность в диапазоне позиционных углов  $115^{\circ} - 160^{\circ}$  (справа) [4, 5]. Оба профиля построены по фотограмметрическим измерениям снимков КК «Зонд-8», доставленных на Землю в октябре 1970 г. На фрагменте профиля справа в таблице приведены селенографические координаты и высотные отметки характерных точек рельефа в районе низменности Юго-Западной.

Таблица	1:	Селеноцентриче	ские ко	оординаты	характерных	точек	рельефа,	отмеченных	на	рис.	1в	районе
низменн	ості	и Юго-Западной	. Высот	га дана над	ц сферой рад	иуса 173	38.0 км					

Номер	Долгота	Широта	Высота
1	-150.8	-19.0	+4.0
2	-151.6	-31.0	-6.1
3	-151.7	-31.5	-3.9
4	-151.9	-36.0	-7.1
5	-152.2	-43.4	-2.5
6	-150.5	-72.0	+6.8
7	-147.0	-85.9	+9.6

видно из таблицы, самая глубокая отметка более чем на 7 км ниже среднего уровня 1738.0, а самая высокая превосходит его более, чем на 9 км (в табл. 1 эти две отметки взяты в прямоугольные рамки).

Научная программа орбитальной съемки Луны с кораблей «Зонд-6, -8» была разработана профессором Борисом Николаевичем Родионовым. Вместе со своими коллегами, еще будучи преподавателем МИИГАиК, он разработал геометрическую схему фотографирования Луны, а также подготовил аппаратуру для орбитальной съемки. Идея посмотреть на Луну «в профиль» оказалась весьма плодотворной, так как именно такой способ орбитальной съемки, когда обратная сторона Луны видна в сечениях, перпендикулярных видимым с Земли, позволил открыть ранее неизвестную общирную низменность.

В 1971 г. рельеф обратной стороны Луны измерялся лазерным высотомером с борта космического корабля «Аполлон-15». Если высотные профили кораблей «Зонд» были ориентированы в основном вдоль меридианов, то плоскость аполлоновской орбиты располагалась вблизи лунного экватора. Высотный профиль «Аполлона-15» также показал наличие обширной низменности на обратной стороне Луны. Селенографическое положение трех упомянутых высотных профилей (два зондовских и один аполлоновский), нанесенное на карту обратной стороны Луны, явно указывало на то, что полученные высотные разрезы принадлежат одной обширной низменности, размеры которой сопоставимы с морями видимого полушария [4, 5, 6].



Рис. 2: Южная часть территории обратной стороны Луны на фотокарте, построенной по орбитальным наблюдениям с автоматической станции LRO. Обширная темная область в центре представляет центральную часть бассейна ЮПЭ. Стрелки с надписями названий призваны показать несколько интересных кратеров в районе бассейна ЮПЭ и его окрестностях, включая кратер Карман. Стрелка вверху справа указывает на положение моря Восточного.

#### 3. Дальнейшие исследования низменности и бассейна

Описанные выше результаты дали мощный импульс исследованиям вновь открытого объекта на обратной стороне Луны, которая то того момента считалась материковой территорией сплошь покрытой горами. Многие ученые как у нас в стране, так и за рубежом [7, 8, 9, 10] активно взялись за обследование обратной стороны Луны и новой низменности. Тем более, что к этому времени уже был накоплен значительный объем орбитальных наблюдений Луны, включая ее обратную сторону. Любопытно в этой связи отметить, что незадолго до полета «Зонда-6» была выполнена съемка всей лунной территории четырьмя американскими спутниками «Лунар-Орбитер-I, -II, -III, -IV». Тысячи фототелевизионных изображений высокого разрешения (от 2 до 60 м на поверхности Луны) были переданы на Землю. Однако, никаких сообщений по материалам этой съемки о наличии общирной низменности на обратной стороне, мы не встречали.

В результате многочисленных исследований ученые пришли к выводу, что низменность Юго-Западная представляет собой центральную часть большого ударного многокольцевого бассейна на обратной стороне Луны (см. рис. 2, 3, 4), а сам бассейн получил рабочее название «Южный Полюс — Эйткен» (ЮПЭ). К сожалению, об авторах открытия как-то быстро забыли. Так, например, в статье Википедии, посвященной бассейну, имена авторов открытия низменности вообще не упоминаются(!).

Наиболее обстоятельными исследованиями бассейна ЮПЭ следует признать цикл работ, выполненных сотрудниками отдела физики Луны и планет ГАИШ [14, 15, 16, 17]. Так, фундаментальная публикация 2007 г. [13] содержит собственные результаты ее авторов, а также подробное обследование строения бассейна и его окрестностей по большому числу отечественных и зарубежных источников. Эта публикация включает в себя всесторонний анализ топографии бассейна и его окрестностей, что позволило авторам впервые достоверно определить общий диаметр бассейна, равный около 3500 км. При этом авторы выделяют внешнее кольцо бассейна и выявляют структуру колец его центральной части. Отличительной чертой рассматриваемой статьи служит глобальный анализ строения бассейна. В частности, авторы обращают внимание на асимметрию в расположении колец бассейна на поверхности Луны, а также на очень малое соотношение глубина-диаметр. Анализируя результаты собственных исследований, а также результаты других авторов, связанные с происхождением бассейна, исследователи из ГАИШ делают гипотетический вывод о том, что уникальные особенности в природе бассейна ЮПЭ могут проистекать из необычного процесса его образования в результате падения тела кометного типа.

На рис. 5 представлены снимки посадочной платформы миссии «Чанъ'э-4» и Лунохода, а также схематическая карта перемещения Лунохода по днищу кратера Карман. Миссия «Чанъ'э-4» работает в бассейне ЮПЭ уже второй год, демонстрируя высокую жизнеспособность автоматики и систем управления столь



Рис. 3: Вид центральной части бассейна «Южный Полюс — Эйткен» на гипсометрической карте Луны [11] — слева, и на топографической карте построенной по измерениям с борта Клементины [12] — справа. Красная стрелка на топографической карте указывает положение кратера Карман. На левом верхнем краю низменности красным кружком и буквой «А» показано положение кратера Эйткен, на правом краю красным овалом и буквой «О» отмечено положение моря Восточного.



Рис. 4: Строение бассейна «Южный Полюс — Эйткен». Слева — выделенные кольца структуры бассейна ЮПЭ, нанесенные для наглядности на изображение Луны в косой ортографической проекции с центральным меридианом 160° восточной долготы. Справа — структура внешнего кольца бассейна ЮПЭ (3D-проекция). На изображении отмечено положение некоторых деталей рельефа лунной поверхности: 1 — кратер Циолковский, 2 — окраина моря Москвы, 3 — бассейн Королев, 4 — часть центральной депрессии Моря Восточного, 5 — окраина кратера Байи (Bailly), 6 — гора Малаперт, 7 — восточная граница депрессии Моря Южного. Гипсометрическая структура внутренней депрессии ЮПЭ не показана [13].

сложного и масштабного научного эксперимента в системе «Земля-Луна». Глубина научной проработки всей миссии в целом и ее отдельных составляющих производит довольно сильное впечатление, даже если знакомишься с ними по Интернет-сообщениям отдельных авторов.



Рис. 5: Фотоснимки, выполненные камерами «Чанъ'э-4» на днище кратера Карман на обратной стороне Луны в центральной части бассейна «Южный полюс — Эйткен»: посадочная платформа (вверху слева) снята с Лунохода панорамной камерой, Луноход (вверху справа) сфотографирован с посадочной платформы камерой, предназначенной для съемки лунной поверхности (Terrain camera). В нижней части рисунка показан путь, проделанный Луноходом за первые два дня (слева) и за первые три дня (справа). Один день на Луне равняется примерно 14.5 земным суткам. Снимки заимствованы с сайта https://habr.com/ru/post/446276/, авторы публикации: инженер Денис denis-19 и редакция Хабра [18].

Приятно также отметить, что энергетическая установка посадочной платформы, изготовленная российскими учеными из НИЦ «Курчатовский институт», по сей день надежно обеспечивает успешную работу миссии в холодные лунные ночи.

#### 4. Заключение

В целом надо поздравить наших китайских коллег с грандиозным успехом в деле изучения космоса и освоения лунных территорий и пожелать им новых достижений.

Работа выполнена при поддержке средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

#### Список литературы

- 1. B. Rodionov, I. Isavnina, Y. Avdeev, V. V. Blagov, et al., Preprint-41 IKI AN SSSR, 34, 1970.
- 2. B. N. Rodionov, I. V. Isavnina, Y. F. Avdeev, V. D. Blagov, et al., Kosm. Issled., 9, 450, 1971.
- 3. B. N. Rodionov, I. V. Isavnina, Y. F. Avdeev, V. D. Blagov, et al., Cosmic Research, 9, 410, 1971.
- 4. B. Rodionov, A. Nefed'ev, M. Shpekin, S. Valeev, and V. Kiselev, Kosm. Issled., 14, 624, 1976.
- 5. B. N. Rodionov, A. A. Nefedev, M. I. Shpekin, S. G. Valeev, and V. V. Kiselev, Cosmic Research, 14, 624, 1977.
- 6. B. Rodionov, Iz istorii izucheniya luny sovetskimi kosmicheskimi apparatami, 1999, GAISh, Moskva., Available at http://selena.sai.msu.ru/Symposium/rodionov.doc (2020/02/06).
- 7. C. M. Pieters, S. Tompkins, J. W. Head, and P. C. Hess, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1903, 1997.

- 8. C. M. Pieters, L. Gaddis, B. Jolliff, and M. Duke, JGR, 106, 28001, 2001.
- 9. J. W. Head, in D. J. Roddy, R. O. Pepin, and R. B. Merrill, eds., Impact and Explosion Cratering: Planetary and Terrestrial Implications, 563–573 (1977).
- H. Hiesinger and I. Head, J. W., in S. Mackwell and E. Stansbery, eds., Lunar and Planetary Science Conference, 1164, Lunar and Planetary Science Conference (2004).
- 11. E. A. Grishakina, E. N. Lazarev, Zh. F. Rodionova, and et al., Gipsometricheskaya karta luny masshtaba 1:13 000 000, 2014, MIIGAiK-GAISh, Moskva., Available at  $http: //www.geogr.msu.ru/science/pubs/element.php?IBLOCK_ID = 7&SECTION_ID = 0&ELEMENT_ID = 11871 (2020/02/06).$
- 12. Wikipedia, Basseyn «Yuzhnyy Polyus Eytken», 2020.
- 13. V. V. Shevchenko, V. I. Chikmachev, and S. G. Pugacheva, Solar System Research, 41, 447, 2007.
- 14. V. V. Shevchenko, A. N. Sanovich, and G. A. Lejkin, in *Lunar and Planetary Science Conference*, 775–776, Lunar and Planetary Science Conference (1985).
- 15. G. Leykin and A. N. Sanovich, Astron. Vestn., 19, 113, 1985.
- V. Chikmachev and V. Shevchenko, Basseyn yuzhnyy polyus eytken na pervyh snimkah obratnoy storony luny, 1999, GAISh, Moskva., Available at http://selena.sai.msu.ru/Symposium/basin.pdf (2020/02/06).
- 17. P. V. Litvin, Zh. F. Rodionova, V. V. Shevchenko, and I. A. Suetova, in *Trudy Mezhdunarodnoy Konferencii* «INTERKARTO 8», Sankt-Peterburg, 411–414 (2002).
- 18. I. D. denis-19 i redakciya Habra, Missiya «Chan'e-4» chetvertyy lunnyy den' dlya posadochnogo modulya i rovera «Yuytu-2»., Available at https://habr.com/ru/post/446276 (2020/02/06).

#### Возможности новых метеорных телекамер

#### Леонов В.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

С развитием современных приемников излучения при наблюдениях метеоров в видимом диапазоне появилась возможность регистрировать сотни метеоров за ночь одной камерой. Ранее для метеорного мониторинга использовались детекторы, разработанные для охранных систем. Специальные астрономические камеры в силу специфики их производства разрабатывались преимущественно по спецзаказам в единичных экземплярах, а их стоимость превышала стоимость стандартной метеорной камеры в сотни и даже тысячи раз. Технологический прогресс и использование инновационных технологий позволили некоторым производителям создать компактные астрономические камеры на основе CMOS-технологии, обладающие требуемым набором характеристик: повышенной чувствительностью, низким уровнем шума и высокой скоростью считывания, тем самым обеспечивать прецизионную регистрацию фотонов. Поэтому возможности новых телевизионных камер требуют специального рассмотрения. В работе проанализированы характеристики одной из таких камер, выполнен сравнительный анализ с другими камерами, применяемыми в настоящее время в ИНАСАН, и дан анализ ее потенциальных возможностей.

#### Capabilities of new meteor TV cameras

Leonov V.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The evolution of modern radiation receivers for observing meteors in the visible wavelength range has made it possible to register hundreds of meteors per night. However, over the past decade, meteor monitoring has mainly been based on detectors developed for security systems. Special astronomical cameras, due to the specifics of their production, were developed and manufactured mainly by special orders in single copies. Their cost exceeded the cost of a standard meteor camera by hundreds or even thousands of times. Technological progress and the use of innovative technologies have allowed some manufacturers to create compact astronomical cameras based on CMOS technology, which have the necessary set of characteristics: high sensitivity, low noise, high reading speed and thus provide precision photon registration, which is especially necessary in meteor astronomy. The paper considers the characteristics of one of these cameras, makes a comparative analysis with other cameras used in INASAN and analyzes its potential capabilities.

**DOI:** 10.26087/INASAN.2020.5.3.015

#### 1. Введение

Исследования метеоров на протяжении многих столетий проводились визуальными методами, а в XX в. к ним добавились фотографические. С появлением оптоэлектронных средств регистрации астрономических событий наблюдения метеоров повысили свою проницающую силу и стали существенно более точными, массовыми и объективными. Прогресс в создании цифровых приемников излучения — как фотоаппаратов, так и видеокамер — привел к тому, что не только профессиональные астрономы, но и астрономы-любители получили возможность проводить более глубокий регулярный мониторинг метеорных явлений, накапливая огромные массивы наблюдений [1, 2]. Программные средства обработки результатов и средства коммуникации позволяют оперативно, зачастую в течение одной наблюдательной ночи, обрабатывать получаемые данные и пересылать их другим пользователям.

Поэтому представляется важным провести сравнение используемых в настоящее время телевизионных систем и новых перспективных камер, а также оценить возможности последних для качественного и количественного повышения эффективности метеорных регистраций.

#### 2. Современные сенсоры для астрономических наблюдений

Стандартная метеорная камера состоит из телевизионного приемника излучения, объектива и интерфейса. Приемники излучения — это преимущественно сенсоры на основе CCD- и CMOS-технологий. Технология второго типа в последнее время чаще используется для производства мегапиксельных камер ввиду дешевизны, а также существенно меньшему времени считывания информации с такого типа детекторов. Объясняется это тем, что CCD-сенсоры по своей сути являются аналоговыми компонентами, и это требует наличия большего количества электроники, обслуживающей сенсор, что также приводит к удорожанию продукции, высокому потреблению энергии и к необходимости дополнительного охлаждения сенсора. CMOS-сенсоры уже содержат все требуемые элементы для получения цифрового изображения — усилители и аналогоцифровые преобразователи (АЦП). Кроме всего прочего они обладают достаточно большим функционалом широкими возможностями интеграции, высокую сопротивляемость шумам и меньшие габариты, что делает их более привлекательными для изготовления астрономических приемников излучения. К детекторам излучения, применяемым в астрономии, предъявляются особые требования, которые сводятся, прежде всего, к необходимости наличия широкого динамического диапазона, высокой квантовой чувствительности (на уровне нескольких фотонов) и высокому разрешению. Детекторы, которые используются в метеорной астрономии, должны еще и обладать большой скоростью считывания информации. Метеорные наблюдения для решения задач траекторных измерений быстропротекающих событий используют самую высокую частоту кадров, при которой длительность экспонирования единичного кадра составляет десятые доли секунды, и за время накопления каждый предыдущий кадр должен быть оцифрован и записан без сбоев. Помимо этого, поскольку наблюдения метеоров проводятся в режиме мониторинга в любое время года, к камерам предъявляются повышенные требования по стойкости к высокой влажности и перепадам температур.

Среди российских производителей приемников излучения для астрономических наблюдений наиболее привлекательными характеристиками обладают камеры из линейки «HEBA» — «HEBA 400», «HEBA 4040» и «HEBA 6060» с разрешением 4, 16 и 36 Мп соответственно, производимые ООО НПК «Фотоника» [3]. Это камеры астрономического и научного применения на базе CMOS-сенсоров с высокой частотой кадров, низким уровнем шумов, высокой квантовой эффективностью, а также большой площадью детектора. Камеры снабжены высокоскоростными оптическими интерфейсами и стойки к воздействиям внешней среды, что позволяет эксплуатировать их вне помещения.

## 3. Особенности телевизионной камеры «HEBA 4040» и ее сравнение с другими камерами

Минимальный сигнал Nот источника света, например, от звезды, регистрируемый камерой, определяется по формуле:

$$N = J_* \frac{4}{\pi \ d^2 \tau},$$

где  $J_*$  — световой поток от источника (звезды), d — диаметр собирающей оптики,  $\tau$  — эффективное время накопления сигнала (кадровая частота). Все эти величины индивидуальны для каждой метеорной камеры, сконструированной на базе того или иного сенсора. Величина N зависит, кроме того, от величины фонового сигнала, шумов считывания, квантового выхода и соотношения «сигнал-шум». Тогда световой поток  $J_*$ от звезды, регистрируемый в элементе разрешения приемника, можно положить равным:

$$J_* = \frac{N\pi d^2\tau}{4}.$$

В случае, если регистрируемый источник света, например, метеор, имеет протяженную структуру [4], т.е. перемещается в кадре, экспонированном за время  $\tau$ , с некоторой угловой скоростью  $\omega$ , и его изображение занимает на приемнике несколько элементов разрешения, на каждый из них попадает только часть света, собранного от метеора за время экспозиции. Соответственно, в величину регистрируемого потока уже от метеора  $J_{\text{Met}}$  необходимо ввести поправку [5, 6], учитывающую это перемещение:

$$j_{\rm Met} = \frac{N\pi d^2\tau}{4} \left\{ \frac{\omega F}{q} + 1 \right\}^{-1}$$

где F — фокусное расстояние объектива, использованного в данной камере, q — размер пикселя.

Разница между предельной звездной величиной камеры по метеорам и предельной звездной величиной по звездам  $\Delta m$ , будет определяться следующим образом:

$$\delta m = 2.5 \lg \left(\frac{\omega F}{q} + 1\right) \tau.$$

Используемые в ИНАСАН метеорные камеры [7], а также камера «НЕВА 4040» [3] с объективом Canon EF 85mm f/1.2L (разрешение  $2048 \times 2048$  пикс., квантовая эффективность 95% и шум чтения 1.6 электрона) имеют характеристики, приведенные в табл. 1, а предельные звездные величины по метеорам этих камер в зависимости от угловой скорости метеоров представлены на рис. 1.

Сравнение характеристик камер показывает, что самая высокая проницающая сила по метеорам была у камеры FAVOR (камера работала в период с 2003 по 2009 г., пока не выпла из строя). Эта высокая проницающая сила достигалась применением в камере гибридной схемы, которая привела к реализации светосилы 1:0.37 [6]. Однако даже при такой светосиле камера имела поле зрения 18°, что в 9 раз меньше (по площади), чем у камер типа MobilCa. При сравнении возможностей камер «HEBA 4040» и FAVOR последняя, хотя и имеет более высокую проницающую силу по метеорам (примерно 3 зв. вел.), почти в 8 раз проигрывает ей по размеру поля зрения и в 3 раза по временному разрешению. В итоге FAVOR имела только

		F (MM)	d (MM)	$\tau$ (сек)	q (мкм)	Поле зрения	Угл. разр.
1	MobilCa	8	10	0.04	8.5	$53^{\circ}$	5'
2	SMAC	85	71	0.13	6.45	$5^{\circ}$	$30^{\prime\prime}$
3	FAVOR	40	150	0.13	6.45	18°	$30^{\prime\prime}$
4	«HEBA $4040$ »	85	71	0.04	9.0	$47^{\circ}$	42''

Таблица 1: Характеристики метеорных камер

одно преимущество перед остальными метеорными камерами — она позволяла регистрировать более слабые метеоры.

В качестве патрульной камеры вариант «HEBA 4040» [3] превосходит все остальные варианты. Она имеет такое же широкое поле зрения, как MobilCa, и такое же временное разрешение, но превосходит ее на 2 зв. вел. по проницающей силе и в 8 раз по точности позиционных измерений.



Рис. 1: Предельная звездная величина метеорных камер по метеорам в зависимости от их угловой скорости.

#### 4. Задачи исследований и ожидаемые результаты

Введение в эксплуатацию новой метеорной камеры, сконструированной на приемнике «HEBA 4040» и светосильном объективе Canon EF 85 mm f/1.2L II USM с постоянным фокусным расстоянием (рис. 2), позволит получить более качественный наблюдательный материал в широких полях зрения с проницающей величиной почти на 2 зв. вел. выше, чем при наблюдениях на патрульных телевизионных камерах. При меньшем уровне шумов эта камера позволит более точно измерять световой сигнал от метеоров. Это даст возможность на основе прямых фотометрических измерений метеоров проводить исследования различных типов, в частности, измерять кинетическую энергию метеорных частиц и долю высвеченной ими энергии, оценки которых проводятся в настоящее время преимущественно теоретически методами [5]. Также окажется возможным измерение мгновенной плотности верхней атмосферы Земли на высотах 80–150 км, что доступно только радиолокационным наблюдениям. Улучшенные характеристики камеры позволят также проводить на новом уровне уже начатые исследования по оценке массы и плотности метеорных частиц на основании абсолютной фотометрии метеоров. Планируется также на основе измерения дрейфа радиантов под действием негравитационных эффектов проводить исследования возраста метеорных потоков.



Рис. 2: Камера «HEBA 4040» и объектив Canon EF 85mm f/1.2L II USM.

В условиях многоцелевых астрономических наблюдений мегапиксельные камеры типа «HEBA» могут быть использованы для решения широкого круга наблюдательных задач. При использовании дополнительного и уже имеющегося оборудования нами намечено проведение спектральных наблюдений метеоров с объективным спектрографом, а в перспективе, после запуска миссии «Луна-25», планируется проведение позиционных наблюдений лазерного маяка на Луне в Симеизской обсерватории [8].

#### 5. Заключение

Камера была испытана сотрудниками ООО НПК «Фотоника» непосредственно при наблюдениях потока Персеиды с объективом Fish-eye и показала достаточно хорошие результаты [9]. Несмотря на пятидесятикратно превышающую стоимость такой камеры по сравнению со стандартными системами для видеонаблюдений на основе CCD-камер типа LCL-902 компании Watec Co., Ltd, представляются перспективными ее достоинства, обусловленные большим размером сенсора, низким уровнем шума и высокой квантовой эффективностью. А недоступный ранее для CMOS-матриц зарядовый бининг при считывании сигнала позволит достичь еще больших значений чувствительности и соотношения «сигнал-шум», то есть еще более повысить проницающую силу камеры по метеорам.

#### Список литературы

- S. Molau, M. Nitschke, M. de Lignie, R. L. Hawkes, and J. Rendtel, WGN, Journal of the International Meteor Organization, 25, 15, 1997.
- 2. A. V. Bagrov, V. A. Leonov, G. F. Attia, and R. Ghoneim, NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 3, 1, 2014.
- 3. OOO NPK "Photonika" Official website of the manufacturer of Optical Devices. URL: https://www.npk-photonica.ru/product/cameras/astronomicheskie-kamery/.
- 4. P. Pecina and P. Koten, A&A, 499, 313, 2009.
- 5. A. V. Bagrov and V. A. Leonov, Ecological Bull. of Res. Centers of the Black Sea Econ. Coop., 2, 26, 2013, in Russian.
- A. Bagrov and V. Leonov, in M. Gyssens, P. Roggemans, and P. Zoladek, eds., Proceedings of the International Meteor Conference, Poznan, Poland, 22-25 August 2013, 142–146 (2014).
- 7. A. V. Bagrov, G. T. Bolgova, and V. A. Leonov, Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel Supplement, 4, 265, 2003.
- A. V. Bagrov, A. O. Dmitriev, V. A. Leonov, I. V. Moskatiniev, V. K. Sysoev, A. E. Shirshakov, and A. D. Yudin, Vestnik "NPO S.A. Lavochkina", 4, 5, 2017, in Russian.
- 9. Nochnaya zhizn' neba ili v poiskah Perseid Biblioteka OOO NPK "Fotonika". URL: https://www.npk-photonica.ru/nochnaya-zhizn-neba-ili-v-poiskah-perseid-pdf170325.pdf.

### Содержание

Верещагин С.В., Сизова М.Д., Шустов Б.М. Пары скоплений и двойные звездные скопления	85
Шустов Б.М., Верещагин С.В., Сизова М.Д. О стохастическом подходе к оценке частоты	
сближений звезд и звездных скоплений с Солнцем	89
Маров М.Я., Ипатов С.И. Миграция планетезималей из зоны питания планет-гигантов к планетам	
земной группы и Луне	94
Ипатов С.И. Вероятности столкновений планетезималей из разных частей зоны питания планет	
земной группы с формирующимися планетами, Луной и их зародышами	97
Ипатов С.И., Феоктистова Е.А., Светцов В.В. Оценки изменения численности околоземных	
объектов на основе возрастов лунных кратеров в течение последнего миллиарда лет	100
Малков О.Ю., Поляченко Е.В., Расторгуев А.С., Самусь Н.Н. Современная звездная	
астрономия	103
Соколова М.Г., Сергиенко М.В. Радианты и элементы орбит метеороидов комплекса д-Канкриды .	125
Сичевский С.Г., Шугаров А.С., Сачков М.Е., Иосипенко С.В., Архангельский Р.Н., Буслаева А.С.,	
Шустов Б.М. Блок камер поля космической обсерватории «Спектр-УФ»	129
<i>Кузин С.П.</i> Основные требования, предъявляемые к системе DORIS для контроля геодезических	
параметров Земли	134
Кузин С.П. Разработка предложений по построению системы контроля геодезических параметров	105
Земли	137
Кохирова Г.И., Буриев А.М., Хамроев У.Х. Координаты и орбита кометы 21Р/Джакобини-Циннера	1.40
по наолюдениям в оосерваториях Таджикистана	142
Кохирова Г.И., Иванова А.В., Буриев А.М., Хамроев У.Х., Рахматуллаева Ф.Дж. Результаты	140
наолюдений кометы 29Р/Швассмана-Вахмана 1 в обсерватории Санглох	140
Боноарь Ю.А., Захарченко В.Д., Карликова И.А., Кивокурцева П.И., Коваленко И.І.	
Сверхоыстрая оценка лучевой скорости потенциально опасных для Земли астероидов методом	159
дрооного дифференцирования доплеровского сигнала	193
шиекин м. и. вассеин «Южный Полюс — Эйткен» от первых измерении («Зонд-о», 1968) до первой	157
посадки лунохода («Чанъ э-4», 2019) $\dots$ то точеново Посадки лунохода («Чанъ э-4», 2019) $\dots$ то точеново Посадки лунохода («Чанъ э-4», 2019) $\dots$ то точеново посадки линости и посадки линости	169
леонов D.A. Dозможности новых метеорных телекамер	103

### Contents

Vereshchagin S.V., Sizova M.D., Shustov B.M. Binary and double star clusters	85
Shustov B.M., Vereshchagin S.V., Sizova M.D. On a stochastic method for evaluating the approach	
frequency of stars and Solar system	89
Marov M.Ya., Ipatov S.I. Migration of planetesimals from different distances from the feeding zone of	
the giant planets to the terrestrial planets and the Moon	94
Ipatov S.I. Probabilities of collisions of planetesimals from different parts of the feeding zone of the	
terrestrial planets with the forming planets, the Moon, and their embryos	97
Ipatov S.I., Feoktistova E.A., Svetsov V.V. Estimates of variations in the number of near-Earth objects	
based on the ages of lunar craters over the past billion years	100
Malkov O. Yu., Polyachenko E. V., Rastorguev A.S., Samus N.N. Modern stellar astronomy	103
Sokolova M.G., Sergienko M.V. Radiants and orbital elements of meteoroids complex $\delta$ -Cancrids	125
Sichevsky S.G., Shugarov A.S., Sachkov M.Y., Iosipenko S.V., Arkhangelsky R.N., Buslaeva A.S.,	
Shustov B.M. Field Camera Unit of WSO-UV mission	129
Kuzin S.P. The main requirements for the DORIS system for monitoring geodesic parameters	
of the Earth	134
<i>Kuzin S.P.</i> Development of proposals for the construction of a system for monitoring geodetic parameters	
of the Earth	137
Kokhirova G.I., Buriev A.M., Khamroev U.Kh., Positions and orbit of comet 21P/Giacobini-Zinner from	1.40
observations in Tajikistan	142
Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Buriev A.M., Khamroev U.Kh., Rakhmatullaeva F.J. Results of observa-	140
tions of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 in Sanglokh observatory	146
Bondar Yu.A., Zakharchenko V.D., Karlikova I.A., Kivokurtseva P.I., Kovalenko I.G. Super-fast	
estimation of radial speeds of potentially hazardous for Earth asteroids by the method of a fractional	150
differentiation of the doppler signal	153
Shpekin M.I. "South Pole — Aitken" basin from first measurements ("Zond-6", 1968) to first landing of	
the lunar rover ("Chang'e-4", 2019) $\ldots$	157
Leonov V.A. Capabilities of new meteor TV cameras	163