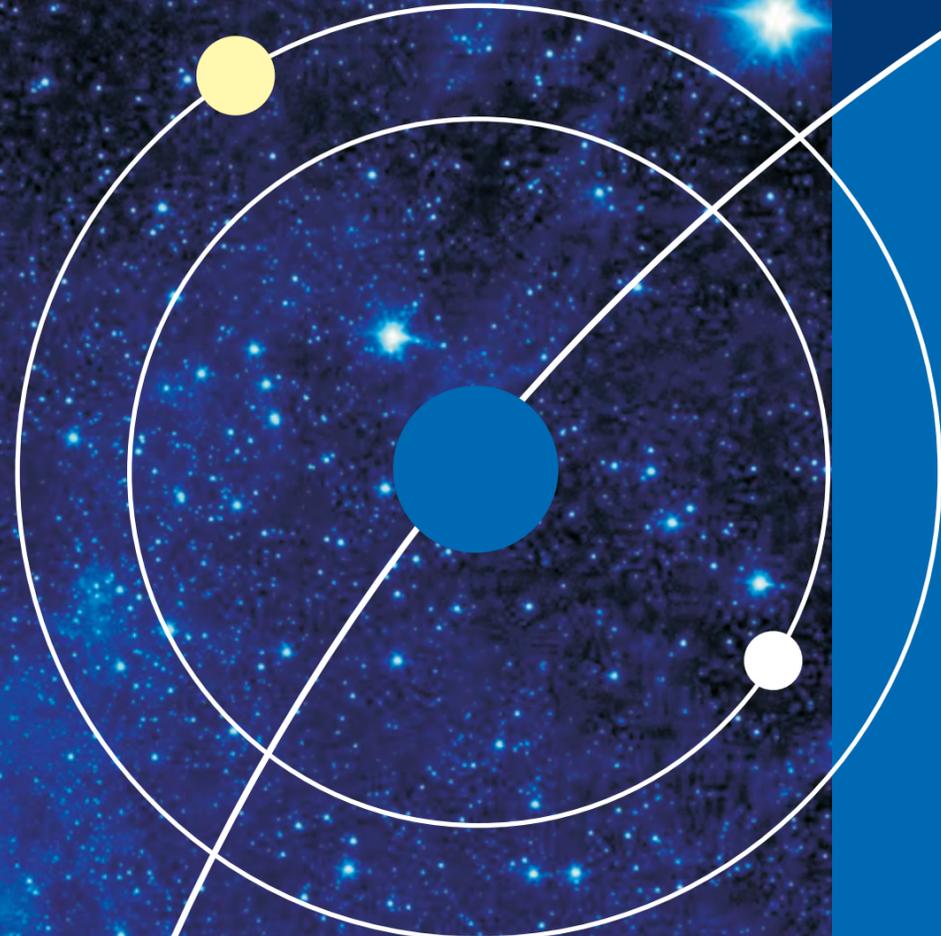


ISSN 2658-5669

e-ISSN 2712-8318

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН

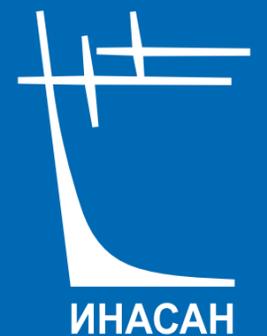
INASAN
SCIENCE
REPORTS



В ЖУРНАЛЕ «НАУЧНЫЕ ТРУДЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН» ПУБЛИКУЮТСЯ 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.



ТОМ
6
ВЫПУСК 1



МОСКВА
2021

УДК 52
ББК 22.6
НЗ4

НЗ4 **Научные труды Института астрономии РАН. Том 6(1).** –
М.: Изд-во Янус-К, 2021, 32 с., илл.

ISSN 2658-5669

e-ISSN 2712-8318

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, 2021
© Коллектив авторов, 2021

INASAN Science Reports. Vol 6(1). M.: Janus-K, 2021, 32 pp.

ISSN 2658-5669

e-ISSN 2712-8318

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, 2021
© Author team, 2021

Научное издание

**Научные труды
Института астрономии РАН.
Том 6 (1)**

Сдано в набор 20.10.2021. Подписано в печать 29.10.2021
Формат 60x90/8. Бумага офсетная
Уч.-изд. п.л. 4,0. Физ. п.л. 4,0. Тираж 100. Заказ №5723

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

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



Оценка характеристик звезд по SDSS и 2MASS фотометрии

Сичевский С.Г.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В работе описан и апробирован на выборке размером ~ 300 звезд теоретико-вероятностный подход, который на основе блеска в полосах $ugriz$ и JHK_s позволяет вынести суждение о значениях атмосферных характеристик звезды и полном поглощении. Подход основан на методе максимального правдоподобия с использованием поискового индекса по типу $k-d$ дерева, для создания которого использовались результаты вычислений моделей звездных атмосфер Куруца.

Ключевые слова: характеристики звезд, фотометрия, численные методы

Separation of stellar properties using SDSS, 2MASS magnitudes

Sichevsky S.G.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

We present a probability-theoretic approach to separation of stellar properties using SDSS, 2MASS magnitudes. The approach is based on the maximum likelihood method using a search index of the type $k-d$ tree. Using synthetic photometry of Kurucz model spectra, the search index is constructed and the approach is tested on sample of ~ 300 stars.

Keywords: stellar parameters; photometry; numerical method

DOI: 10.51194/INASAN.2021.6.1.001

1. Введение

Для исследования излучения большего числа звезд обычно применяют многоцветную (многополосную) фотометрию, то есть измерение потока излучения в определенных участках спектра (полосах). В современных обзорах накоплены результаты фотометрии от УФ до ИК миллионов звезд. Межзвездная среда ослабляет проходящее сквозь нее излучение звезд и искажает распределение энергии в их спектре. Поэтому определение характеристик звезд и межзвездной среды — задачи, взаимосвязанные друг с другом [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Метод для отождествления [8, 9] млн. объектов в современных обзорах дает дополнительные возможности для решения задачи совместного определения характеристик звезд и межзвездной среды, так как позволяет использовать все доступные фотометрические данные. Одним из общих способов оценки значения физических характеристик по результатам наблюдений является метод максимального правдоподобия. В вышеупомянутом случае оценкой максимального правдоподобия характеристик звезд и закона межзвездного поглощения будут такие их значения, которым соответствует максимум апостериорной функции плотности вероятностей.

В данной работе изложен теоретико-вероятностный подход, который на основе многополосной фотометрии позволяет вынести суждение о значениях атмосферных характеристик звезды и полном поглощении. Поставленная задача решена способом, основанным на методе максимального правдоподобия, но без использования численных алгоритмов оптимизации. Такой подход потребовал специальных алгоритмов поиска, позволяющих в большом объеме данных быстро находить ближайшего «соседа» к заданной точке в многомерном пространстве. Такие алгоритмы часто основаны на построении поискового индекса — специальным образом упорядоченной структуры данных, например, по типу $k-d$ дерева. Именно этот принцип был выбран в данной работе, и он позволяет в множестве предварительно вычисленных теоретических значений блеска, соответствующих различным значениям характеристик звезд и межзвездного поглощения, найти те, которые наилучшим образом соответствуют наблюдаемым фотометрическим данным.

2. Теоретико-вероятностная модель

Пусть имеются независимые наблюдения n случайных величин. Обозначим $p_i(x_i|\theta)$ функцию плотности вероятности i -й случайной переменной, где θ — параметр, соответствующий семейству распределений p_i . Совместная функция плотностей вероятностей n случайных переменных определяется выражением:

$$p(\mathbf{X}|\theta) = \prod_{i=1}^n p_i(x_i|\theta). \quad (1)$$

В настоящей работе рассматривается случай, когда результатами наблюдений является многополосная фотометрия, а именно пять значений блеска u, g, r, i, z из обзора SDSS и три значения J, H, K_s из обзора 2MASS, а вектор характеристик θ имеет вид:

$$\theta = \{T_{\text{eff}}, g, A_V^0, R_V\},$$

в котором первые два компонента характеризуют звезду, а остальные два — межзвездное поглощение. Таким образом, случайный вектор, по результатам наблюдения которого необходимо оценить интересные характеристики θ , имеет вид¹:

$$\mathbf{X} = \{u, g, r, i, g, J, H, K_s\}.$$

Необходимо оценить значение θ , если проведено n наблюдений x_i , распределенных в соответствии с $p_i(x_i|\theta)$, т. е. найти такое его значение, при котором $p(\mathbf{X}|\theta)$ становится максимальным (метод максимального правдоподобия).

Будем полагать, что результат измерения блеска x_i в i -й полосе является случайной величиной, распределенной по нормальному закону. В этом случае

$$p(x_i|\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_i^2}} \exp \frac{-(x_i - x_i(\theta))^2}{2\delta_i^2},$$

где δ_i — погрешность наблюдаемого значения блеска, а $x_i(\theta)$ является теоретическим блеском звезды, соответствующим параметру θ , и функция правдоподобия определяется соотношением (1):

$$p(\mathbf{X}|\theta) = \prod_i^n p(x_i|\theta).$$

3. Теоретический блеск звезды

Влияние межзвездной среды на распределение энергии в спектре звезды обычно выражают через значение межзвездного поглощения, численное значение которого выражают в звездных величинах:

$$A_\lambda = -2.5 \log \frac{E_{e,\lambda}}{E_{e,\lambda}^0},$$

где $E_{e,\lambda}^0$ и $E_{e,\lambda}$ — энергетические облученности (в единицах $\text{эрг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$) в отсутствии и наличии межзвездного поглощения соответственно. Особенностью межзвездного поглощения является его зависимость от длины волны, которую называют законом межзвездного поглощения. Один из широко используемых законов межзвездного поглощения был предложен Карделли и др. [10]. Согласно этому закону:

$$A_\lambda/A_V^0 = a(\lambda) + \frac{b(\lambda)}{R_V},$$

где $a(\lambda)$ и $b(\lambda)$ — известные коэффициенты, а A_V^0 , R_V — свободные параметры².

Предположим, что расстояние d от звезды до наблюдателя много больше радиуса звезды R , и, пренебрегая эффектом потемнения к краю диска звезды, вычисления приводят к следующему соотношению:

$$E_{e,\lambda} = \frac{\pi R^2}{d^2} L_{e,\lambda},$$

где $E_{e,\lambda}$ — спектральное распределение облученности от звезды на «верхней границе» атмосферы Земли, а $L_{e,\lambda}$ — спектральное распределение энергетической яркости звезды, которая определяется атмосферными характеристиками звезды, в том числе такими, как $T_{\text{эф}}$ и g . С учетом межзвездного поглощения энергетическая облученность от звезды с видимым угловым диаметром α_d в месте ее наблюдения определяется соотношением:

$$E_{e,\lambda}(\theta, \alpha_d) = \pi \cdot \frac{\alpha_d^2}{4} \cdot L_{e,\lambda}(T_{\text{эф}}, g) \cdot 10^{-0.4 \cdot A_\lambda(A_V^0, R_V)}. \quad (2)$$

В настоящей работе для расчета значений $L_{e,\lambda}$ использовались результаты вычислений моделей звездных атмосфер Кастелли и Куруца [11] и ATLAS9³. Применяя соотношение (2), был получен набор значений блеска в полосах $ugriz$ и JHK_s для различных значений параметра θ , соответствующих широкому диапазону значений как эффективной температуры и поверхностного ускорения, так и характеристик закона межзвездного поглощения. Далее были вычислены величины

$$\tilde{x}_i^k = x_i^k - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^k, \quad (3)$$

¹Точнее вектор $\tilde{\mathbf{X}}$, компоненты которого определяются соотношением (3).

²Значения A_V^0 и R_V являются свободными параметрами в том смысле, что в данной модели закона межзвездного поглощения вычисление значения A_λ подразумевает выбор конкретных их значений.

³Программный комплекс ЭВМ для вычисления распределения энергии в спектре звезды в условиях ЛТР на основе плоскопараллельной модели атмосферы.

где x_i^k — блеск в i -й полосе для k -го значения параметра θ , а n — количество полос в фотометрической системе. В отличие от блеска x_i^k величины \tilde{x}_i^k не зависят ни от расстояния до звезды, ни от ее радиуса и в этом смысле являются инвариантами⁴.

4. Реализация и проверка

Прямой подход к реализации метода максимального правдоподобия требует вычисления блеска звезды для любого значения параметра θ и, следовательно, расчета соответствующей модели звездной атмосферы для вычисления спектра излучения. При этом численный расчет даже не самых сложных моделей требует немало времени. По этой причине прямой подход не используется, а с целью построения гистограммы, соответствующей функции правдоподобия, проводится численное статистическое моделирование, цель которого — получить такую выборку значений θ , при которой соответствующие им значения \mathbf{X} ⁵ распределены по нормальному закону. С этой целью на основе полученного набора значений величин \tilde{x}_i был построен поисковый индекс (на базе $k-d$ дерева). Индекс обеспечивает быстрый поиск ближайшего по L^2 -норме «соседа» в восьмерном пространстве значений \tilde{x} .

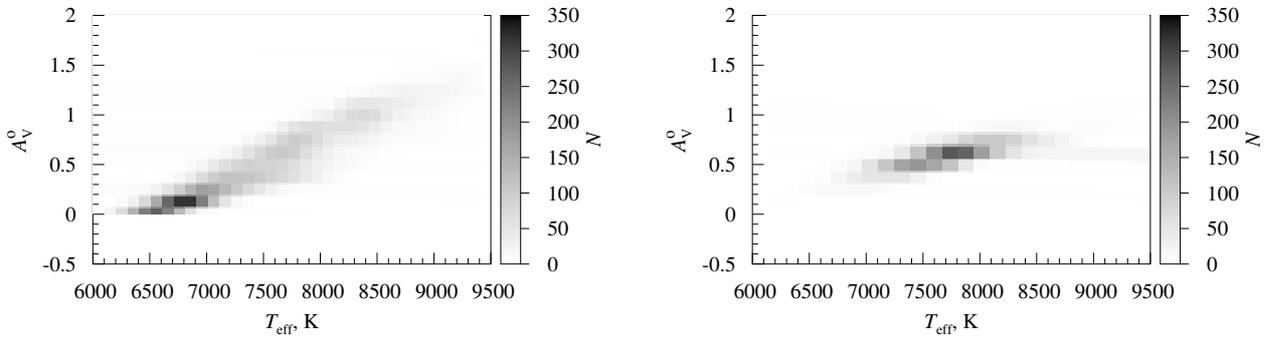


Рис. 1: Гистограммы, соответствующие функции правдоподобия, для оценки значений величин T_{eff} и A_V^0 . Исходные значения величин: $T_{\text{eff}} = 7400$ К и $A_V^0 = 0.5$. Слева гистограмма получена по значениям блеска в полосах $ugriz$ и JHK_s , справа — дополнительно использовались значения блеска в полосах FUV и NUV обзора GALEX.

Моделирование начинается с создания по исходным значениям $ugriz$ и JHK_s выборки объемом пять тысяч случайных значений \mathbf{X} , распределенных по нормальному закону, и, применяя соотношение (3), выполняется их отображение в инвариантные значения $\tilde{\mathbf{X}}$. Используя поисковый индекс, для каждого значения $\tilde{\mathbf{X}}$ определяется соответствующее значение θ . Полученная выборка значений θ суммируются в более компактный вид, т. е. гистограмму, соответствующую функции правдоподобия. Анализируя получаемые гистограммы (см. рис. 1), определяются интервальные оценки характеристик, такие как квантили⁶, и точечная оценка, соответствующая максимуму на гистограмме.

Анализ получаемых оценок характеристик звезд и закона межзвездного поглощения выполнен с помощью проверочного набора размером $\sim 2 \times 10^3$ моделей звездных атмосфер⁷, соответствующих случайным значениям температуры, поверхностного ускорения и межзвездного поглощения (см. рис. 2). Для этих моделей были вычислены значения блеска в полосах $ugriz$ и JHK_s и по этим значениям получены оценки атмосферных характеристик звезд и межзвездного поглощения. В результате проведено сравнение исходных значений характеристик с их оценками на основе совместного анализа значений блеска звезды в полосах $ugriz$ и JHK_s , что проиллюстрировано на рис. 2.

Как стоило ожидать, между оценками эффективной температуры и полного поглощения имеется явная корреляция, которая объясняется тем, что они схожим образом влияют на спектр звезд. В целом, максимальное значение относительной погрешности эффективной температуры близко к 20%, при этом в большинстве

⁴Поэтому для вычисления значений \tilde{x}_i^k значением углового диаметра α_d может быть любое число, например, единица.

⁵Напомним, компонентом случайного вектора \mathbf{X} является результат измерения блеска звезды, который моделируется случайной величиной с нормальным распределением.

⁶Квантиль — такое число, что заданная случайная величина не превышает его лишь с фиксированной вероятностью. Например, 0.25-квантиль — число, ниже которого лежит примерно 25% выборки.

⁷Значение металличности соответствует солнечному.

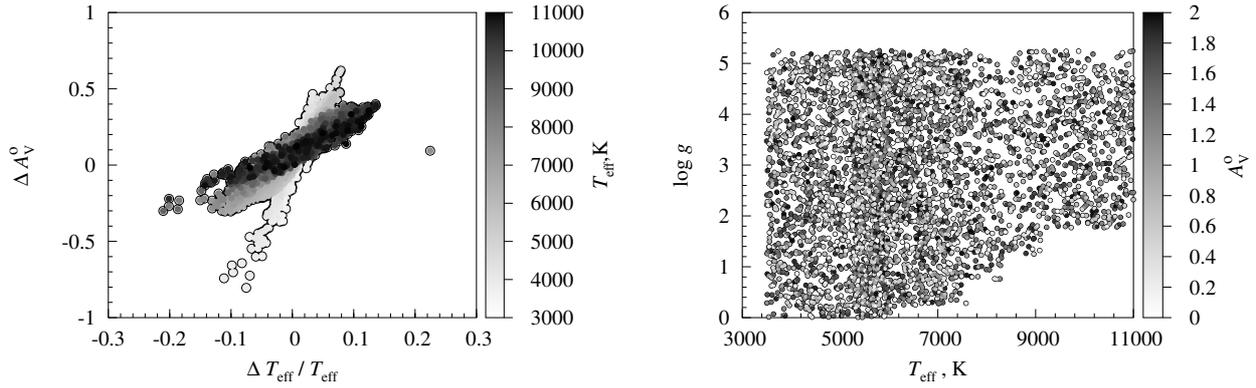


Рис. 2: Слева. Корреляция между оценками значений полного поглощения и температуры. Справа. Значения характеристик проверочного набора моделей звездных атмосфер.

случаев ее значение — не более 10%, что подтверждает возможность использовать вышеописанный способ для разделения звезд по эффективной температуре.

Следующим шагом стала проверка на реальных данных. С этой целью сделана выборка звезд из обзора SEGUE/SDSS и проведено их отождествление с объектами из обзора 2MASS. В результате сформирована выборка размером ~ 300 звезд, для которых известны как значения блеска в полосах $ugriz$ и JHK_s , так и значения эффективной температуры и поверхностного ускорения, оценку которых выполнили авторы SEGUE/SDSS, анализируя спектры звезд. Для всех звезд из этой выборки по значениям их блеска были получены оценки атмосферных характеристик и полного поглощения. Сравнение исходных значений характеристик с их оценками показано на рис. 3.

Результаты, полученные с помощью моделей звездных атмосфер, могут плохо соотноситься с реальными наблюдениями, так как при создании модели делаются определенные упрощения и предположения. Одним из критериев оценки возможности применения модели является значение суммы квадратов остаточных отклонений (СКО) между наблюдаемыми и соответствующими параметру θ значениями блеска. Именно такой критерий был применен в данной работе. На рис. 3 видно, что с ростом СКО растет и относительная погрешность температуры. Поэтому для дальнейшего анализа считалось, что для случаев с СКО не более 0.01 имеется приемлемое соответствие между наблюдаемыми данными и модельными расчетами. На верхних панелях рис. 3 показаны значения относительного отклонения температуры и поверхностного ускорения от их исходных значений. В целом, результаты, представленные на рис. 3, подтверждают, что вышеописанный способ анализа значений блеска в полосах $ugriz$ и JHK_s пригоден для разделения звезд по их характеристикам.

Дополнительно можно отметить, что, анализируя значения блеска звезды вышеописанным способом, можно получить и оценку видимого углового диаметра α_d . Будем считать, что по исходным значениям блеска x_i в полосах $ugriz$ и JHK_s вычислены значения \tilde{x}_i , в свою очередь используя которые с помощью поискового индекса создана соответствующая выборка значений параметра θ . Каждому значению параметра θ соответствует свое модельное значение блеска x_i . Вычислив разницу между модельными и исходными значениями блеска в полосах $ugriz$ и JHK_s , можно построить гистограмму, соответствующую функции правдоподобия, для оценки значения видимого углового диаметра α_d звезды. Можно применить иной способ — модельные значения блеска x_i в полосах $ugriz$ и JHK_s должны соответствовать абсолютным звездным величинам. Тогда разница между исходными значениями блеска в полосах $ugriz$ и JHK_s и значениями, соответствующими выборке параметра θ , будет являться ничем иным как модулем расстояния. Для реализации такого подхода, согласно соотношению (2), необходимо вычислить видимый с расстояния 10 пк угловой диаметр звезды, т. е. необходимо оценить радиус звезды для конкретных значений ее температуры и поверхностного ускорения. Это возможно сделать на основе современных расчетов моделей внутреннего строения и эволюции звезд, например, использовать способ определения радиуса звезды по ее атмосферным характеристикам, изложенный в работах [12, 13, 14, 15]. В целом, такой подход позволяет не только оценить α_d , но и модуль расстояния, однако подробное исследование таких оценок выходит за рамки данной работы.

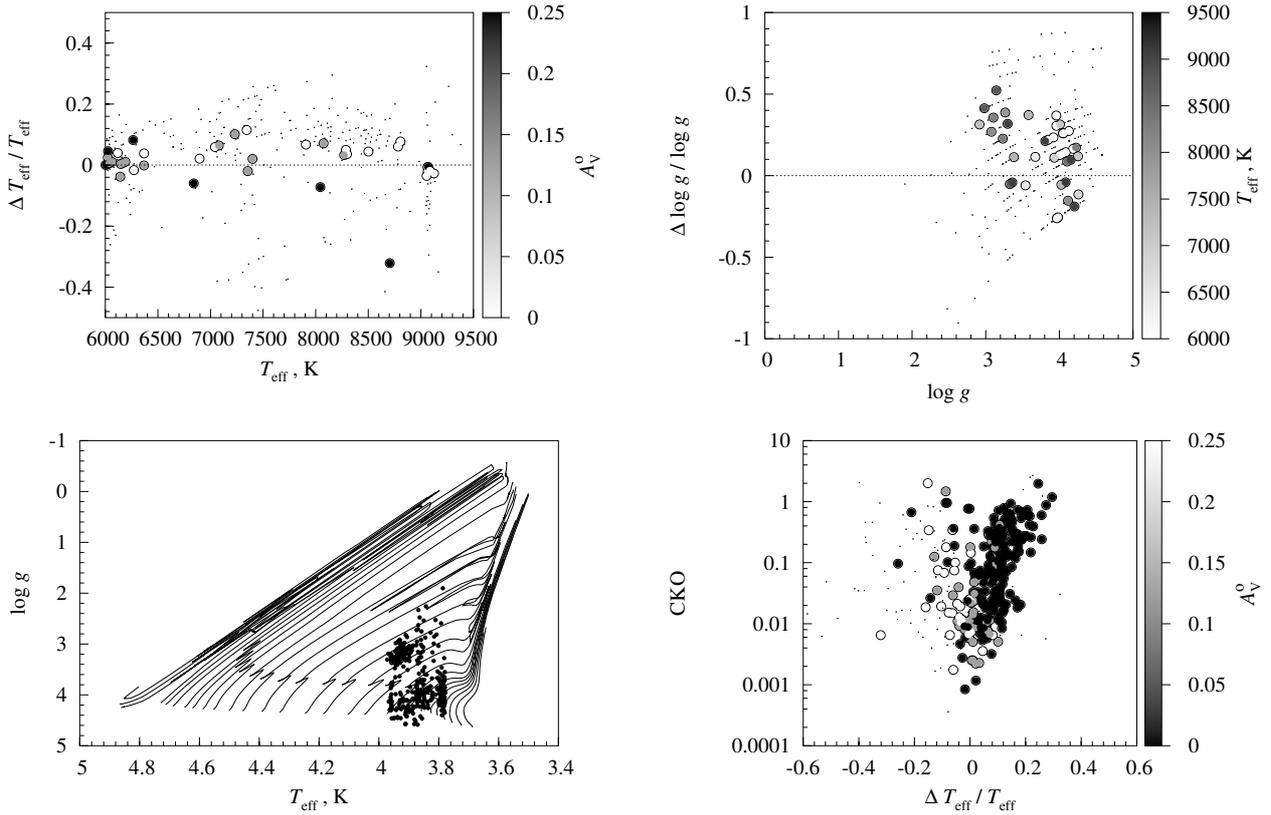


Рис. 3: *Вверху* — относительные отклонения температуры и поверхностного ускорения от их исходных значений, случаи с СКО > 0.01 и $A_V^0 > 0.25$ показаны черными точками меньшего размера. *Внизу* — значения эффективной температуры и поверхностного ускорения звезд в подготовленной выборке; зависимость относительной погрешности температуры от значения СКО, случаи с $A_V^0 > 0.25$ показаны черными точками меньшего размера.

5. Заключение

Возможность расчета блеска звезды на основе современных моделей их звездных атмосфер позволяет оценивать характеристики звезд и межзвездной среды путем сравнения результатов наблюдений с расчетами. В данной работе изложен теоретико-вероятностный подход, который на основе блеска в полосах $ugriz$ и JHK_s позволяет провести разделение звезд по их атмосферным характеристикам, а также вынести суждение о полном поглощении. Поставленная задача решена способом, основанным на методе максимального правдоподобия, без применения численных алгоритмов оптимизации, но с построением и использованием поискового индекса — специальным образом упорядоченной структуры данных по типу $k-d$ дерева. Способ проверен на выборке размером ~ 300 звезд, для которых известны как значения блеска в полосах $ugriz$ и JHK_s , так и значения эффективной температуры и поверхностного ускорения. Такой подход, в отличие от численных методов оптимизации, имеет ряд преимуществ: отсутствие необходимости первого приближения, исключение попадания в локальный минимум и высокая скорость работы.

Список литературы

1. O. Y. Malkov, S. G. Sichevskij, and D. A. Kovaleva, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **401**, 695, 2010.
2. S. Sichevskij, *Astronomy Reports*, **56**, 710, 2012, URL <http://dx.doi.org/10.1134/S1063772912090089>.
3. S. G. Sichevskiy, A. V. Mironov, and O. Y. Malkov, *Astronomische Nachrichten*, **334**, 832, 2013.
4. S. G. Sichevskij, A. V. Mironov, and O. Y. Malkov, *Astrophysical Bulletin*, **69**, 160, 2014.
5. S. Sichevsky and O. Malkov, *Baltic Astronomy*, **25**, 67, 2016.
6. S. G. Sichevskij, *Astrophysical Bulletin*, **73**, 98, 2018.
7. O. Malkov, S. Karpov, E. Kilpio, S. Sichevsky, et al., *Open Astronomy*, **27**, 62, 2018.
8. S. V. Karpov, O. Y. Malkov, and A. V. Mironov, *Astrophysical Bulletin*, **67**, 82, 2012.

9. O. Malkov, O. Dluhnevskaya, S. Karpov, E. Kilpio, A. Kniazev, A. Mironov, and S. Sichevskij, *Baltic Astronomy*, **21**, 319, 2012.
10. J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis, *Astrophys. J.*, **345**, 245, 1989.
11. F. Castelli and R. L. Kurucz, in N. Piskunov, W. W. Weiss, and D. F. Gray, eds., *Modelling of Stellar Atmospheres, IAU Symposium*, volume 210, 20P (2003).
12. S. G. Sichevskij, *Astronomy Reports*, **61**, 193, 2017.
13. S. G. Sichevskij, *Astrophysical Bulletin*, **72**, 51, 2017.
14. S. G. Sichevskij, *Astronomy Reports*, **60**, 816, 2016.
15. S. G. Sichevskij, *Astronomy Reports*, **60**, 598, 2016.

Низкоорбитальная спутниковая группировка системы контроля геодезических параметров Земли и направления ее развития

Кузин С.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Спутниковые миссии наряду с наземными геодезическими сетями различных космических технологий являются второй важной составляющей российского сегмента системы контроля геодезических параметров Земли (ГПЗ). Спутники имеют неоспоримое преимущество в том, что они непрерывно собирают однородные данные над большими частями земной поверхности. Они позволяют сбор данных, которые не могут быть зарегистрированы на поверхности Земли. Такие спутники в наше время оборудованы множеством датчиков, контролирующих поверхности суши, океана и льда, а также гравитационное поле Земли и его временные изменения. Потенциал и влияние спутниковых миссий для наблюдений Земли значительно возрастут в связи с тем, что: (1) будут запускаться все больше и больше спутниковых созвездий, вместо отдельных спутников, увеличивая тем самым временное и пространственное разрешение получаемых данных; (2) спутники будут летать в «формированиях», образуя большие наблюдательные приборы, состоящие из датчиков, расположенных на нескольких спутниках. В работе автор, с учетом рекомендаций международного геодезического сообщества, предлагает набор низкоорбитальных спутниковых миссий различных направлений, необходимых для полноценного функционирования системы контроля ГПЗ, и рассматривает направления развития данных миссий.

Ключевые слова: система контроля геодезических параметров Земли, низкоорбитальные спутниковые миссии и направления их развития

Low-orbit satellite grouping of the system for monitoring geodesic parameters of the Earth and the direction of its development

Kuzin S.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Satellite missions, along with ground-based geodesic networks of various space technologies, will be the second important component of the Russian segment of the system for monitoring geodesic parameters of the Earth (GPE). Satellites have the undeniable advantage of continuously collecting uniform data over large parts of the Earth's surface. They allow the collection of data that cannot be registered on the Earth's surface. Such satellites are now equipped with a variety of sensors that monitor the surface of land, ocean and ice, as well as the Earth's gravitational field and its temporal changes. The potential and impact of satellite missions for Earth observations will increase significantly as: (1) more and more satellite constellations will be launched, instead of individual satellites, thereby increasing the temporal and spatial resolution of the data received; (2) satellites will fly in "formations", forming large observation instruments consisting of sensors located on several satellites. In this article the author taking into account the international geodetic community recommendations proposes a set of low-orbit satellite missions to various areas, necessary for proper operation of the system for monitoring GPE, and the directions of development of these missions are considered.

Keywords: Earth geodetic parameters monitoring system, low-orbit satellite missions and their development directions

DOI: 10.51194/INASAN.2021.6.1.002

1. Введение

Вторым незаменимым элементом системы контроля ГПЗ, наряду с наземным сегментом системы, будут являться спутники, наблюдающие за Землей из космоса. В связи с важностью спутникового компонента для проектирования и получения продуктов системы контроля ГПЗ, наблюдений за некоторыми геодезическими/геофизическими параметрами Земли (например, гравитационное поле и его временные вариации) конкретные спутниковые миссии не должны заканчиваться с окончанием времени жизни спутника, но должны быть продолжены последующими проектами, устанавливая тем самым цепочку миссий (в качестве примеров можно привести альтиметрические миссии TOPEX, JASON, ERS и другие). Такие «цепочки» спутниковых миссий имеют существенное значение для мониторинга Земной системы в течение длительного периода времени и для выявления долгосрочных тенденций и изменений в Земной системе. Поэтому их следует рассматривать как стратегический элемент системы контроля ГПЗ.

2. Основные низкоорбитальные спутниковые миссии и направления их развития

2.1. Гравиметрические спутниковые миссии и направления их формирования

Миссии CHAMP и GRACE, изучающие гравитационное поле Земли, способствовали огромному улучшению наших знаний о статическом и изменяющемся во времени гравитационном поле Земли. Миссии улучшили точность моделей статического гравитационного поля Земли, по крайней мере, в 100 раз по сравнению

с пре-ШАМП моделями, которые, главным образом, определялись с помощью спутниковых лазерных данных. Миссия Европейского Космического Агентства GOCE привела к еще более значительному улучшению в разрешении и точности определения статического гравитационного поля Земли и расширения наших знаний об океанских течениях. Миссия GOCE также внесла важный вклад в определение более точной унифицированной глобальной вертикальной системы отсчета. Для будущих гравиметрических проектов помимо непосредственного исследования гравитационного поля Земли определяются новые научные задачи, например, такие как исследование глобальной циркуляции океана, гидрологического цикла, изучение векового тренда геоида, эволюции ледниковых щитов и ледников, исследование структуры и динамики земной коры и литосферы, регистрация крупных землетрясений и улучшение вертикальных определений. Для решения перечисленных задач требуются более высокие временные и пространственные разрешения и более высокая точность определяемых параметров. Соответственно, требуются новые разработки регистрирующих датчиков, таких как квантовые градиентометры, регистраторы межспутниковых измерений типа «низкий-низкий» и «высокий-низкий», создание оптических часов и т.д. Одной из очевидных концепций повышения точности межспутниковых измерений (типа «низкий-низкий») является замена К-диапазона связи миссии GRACE оптическими измерениями (лазерный интерферометр). В результате появления межспутниковых оптических измерений можно ожидать 100–1000-кратного повышения точности измерений [1, 2, 3, 4].

2.2. Альтиметрические спутниковые миссии для изучения океанов и ледяных покровов и направления их формирования

Результаты радиолокационной альтиметрии доказали надежность и эффективность данного метода для мониторинга глобального уровня моря и его изменения. В настоящее время на орбите находятся восемь активных миссий радиолокационной альтиметрии (Jason-2, Jason-3, Saral, Cryosat-2, HY-2A, Sentinel-3A, Sentinel-3B и GFOSat) для наблюдений мирового океана с достаточной точностью. Для будущих альтиметрических миссий рекомендовано:

- сохранять преемственность будущих миссий с высокоточной альтиметрической миссией типа Jason;
- сохранить преемственность будущих миссий, по крайней мере с двумя взаимодополняющими альтиметрическими проектами, спутники которых находятся на орбитах с высоким наклоном;
- расширить возможности альтиметрии для более плотного охвата территории наблюдений за счет использование полосных методов альтиметрии [4, 5].

2.3. Интерферометрические радары с синтезированной апертурой (InSAR) и направления их формирования

InSAR наблюдения дают пространственно непрерывные изображения деформации поверхности Земли. Эти изображения являются дополнением к другим наблюдениям космической геодезии, которые производят сглаженные по времени, но пространственно-разрывные точечные измерения поверхностных движений. К 2020 г. ожидалось создание созвездия спутников InSAR с участием США, Европы, Бразилии, Тайваня, Китая и Японии. Однако решение этой амбициозной задачи переносится на более позднее время. Скоординированное созвездие спутников InSAR обеспечило бы несколько многосторонних наблюдений подробной топографической съемки и изучения структуры растительности. Созвездие также способствовало бы более частым наблюдениям в конкретных местах, что позволило бы более оперативно реагировать на такие события, как землетрясения, извержения вулканов и оползни, а также на лучшее определение зависящих от времени явлений [4, 6]. Космическое агентство NASA предложило создать международную информационную систему InSAR (ISIS). К сожалению, реализация данного предложения задерживается.

2.4. Принципы построения будущих низкоорбитальных спутниковых миссий

За последние несколько лет развитие спутниковых технологий происходило чрезвычайно быстрыми темпами, что привело к новым принципам построения будущих спутниковых миссий. Наиболее важными новыми путями развития являются [4, 7]:

- разработка микро- и нано-спутников;
- создание созвездий с большим числом спутников;
- разработка летающих формаций;
- разработка новых приборов.

Первоначально основы создания микро или нано-спутников, в основном, реализовывались студентами в университетских проектах. В настоящее время эти разработки также выполняют национальные космические агентства в качестве альтернативы малым или крупным спутникам для достижения определенных целей миссии. Вместе с концепциями создания микро и нано-спутников, упомянутых выше, существование созвездий из 10–100 спутников станет возможным и доступным в будущем. Летающие формации — другой очень интересный новый путь развития спутниковых миссий. По сравнению с обычными миссиями они добавляют два новых «измерения»: (1) позволяют выполнять межспутниковые измерения (например, связь в К-диапазоне частот между парой спутников GRACE), и (2) открывают дверь для построения виртуальной, более эффективной/точной аппаратуры путем интегрирования приборов, расположенных на нескольких спутниках, в одну большую наблюдательную систему (например, интеграция спутников Terra SAR-X и TanDEM-X для создания высотных цифровых моделей высокого разрешения). Примером смешанной концепции спутникового созвездия и летающей формации является миссия Европейского Космического Агентства SWARM, где два из трех различных спутников находятся в формации для измерения градиентов магнитного поля в направлении Восток-Запад, а третий спутник вращается вокруг Земли на большей высоте, позволяя разделить (наблюдение) различных частей магнитного поля.

2.5. Спутниковая колокация

Совместное размещение различных датчиков и типов наблюдений на борту спутника чрезвычайно важно для установления связи между различными методами наблюдения. Эти связи и их взаимодополняемость могут иметь решающее значение для правильного моделирования некоторых видов наблюдений (например, коррекции негравитационных сил акселерометров в определении гравитационного поля) и для разделения влияния различных процессов или компонентов Земной системы. Кроме того, наличие дополнительных приборов на спутнике (например, глобальных навигационных спутниковых систем ГНСС, лазерного оборудования и приемников системы DORIS для точного определения орбиты) позволяет связывать различные спутниковые технологии, комплементарные к колокации технологий на поверхности Земли, а также детектировать присутствие различным технологиям смещения. Хорошим примером спутниковой колокации является быстрый прогресс в определении орбиты с данными спутника TOPEX/Poseidon, с помощью измерений систем DORIS, GPS, лазерной локации и альтиметрии. Для будущих спутниковых проектов основной акцент должен делаться на размещении на спутниках оборудования для установления связи между различными наблюдениями и методами слежения. Следует отметить важность оснащения всех спутников ГНСС лазерными светоотражающими массивами. Основной мотивацией для размещения спутниковых лазерных ретрорефлекторов на ГНСС аппаратах является установление связей между наблюдательными сетями Международной Земной системы отсчета (ITRF). Результатом таких связей будет повышение точности спутниковых орбит ГНСС и создание более стабильной Международной Земной системы отсчета.

3. Заключение

В статье рассмотрен набор средств низкоорбитальной спутниковой группировки системы контроля ГПЗ и показаны направления их формирования с учетом анализа и рекомендаций международных геодезических служб. Необходимо подчеркнуть, что реализация вышеперечисленных низкоорбитальных спутниковых миссий требует значительных материальных затрат. Поэтому важным моментом для выполнения рассмотренных программ является международная кооперация как на государственном, так и научном уровнях. Следует отметить, что в создании низкоорбитальной спутниковой группировки Россия значительно отстает от других высокоразвитых стран. На данный момент в России не имеется ни одной работающей космической системы из вышеперечисленных направлений. Создание таких систем требует существенных финансовых затрат и значительного времени, поэтому дальнейшее откладывание разработки и эксплуатации гравиметрических, альтиметрических и InSAR миссий лишь усугубляет существующий научно-технологический разрыв в данной области исследований и не отвечает интересам российских потребителей системы контроля ГПЗ.

Список литературы

1. C. Reigber, H. Lühr, and P. Schwintzer, *Advances in Space Research*, **30**, 129, 2002.
2. B. D. Tapley, C. Reigber, and J. C. Ries, in *AAS/Division of Dynamical Astronomy Meeting #34*, 07.01, AAS/Division of Dynamical Astronomy Meeting (2003).
3. A. Eicker, T. Mayer-Guerr, and K. H. Ilk, in C. Jekeli, L. Bastos, and J. Fernandes, eds., *Gravity, Geoid and Space Missions*, 66 (2005).
4. H.-P. Plag and M. Perlman, *Global Geodetic Observing System*, 1–332, 2009.
5. D. Cotton, P. N. Garcia, M. Cancet, O. Andersen, et al., in *Living Planet Symposium, ESA Special Publication*, volume 740, 66 (2016).
6. N. Anantrasirichai, J. Biggs, F. Albino, and D. Bull, *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 11,850, 2019.
7. *Earth Science and Applications from Space, National Research Council, The National Academies* (2007).

Ключевая роль ГНСС для контроля геодезических параметров Земли

Кузин С.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) являются основным инструментом для контроля геодезических параметров Земли, построения и постоянного контроля земной системы отсчета и связи измерений различных спутниковых геодезических технологий. ГНСС состоят из наземного сегмента (приемники ГНСС) и орбитальной группировки (навигационные спутники системы). Микроволновый диапазон сигналов ГНСС позволяет использовать данные системы при любых погодных условиях, а двухчастотные несущие позволяют, в значительной степени, исключить ионосферную задержку распространения сигналов. Помимо выполнения основных геодезических определений навигационные системы также могут быть использованы для решения социальных и других позиционных измерений, требующих высокой точности. В данной статье автором рассмотрены основные задачи, решаемые ГНСС, определены требования к точности продуктов навигационных систем и приведены направления развития наземной и орбитальных частей ГНСС, учитывая потребности мирового геодезического сообщества.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), точность и направления развития ГНСС, геодезические параметры Земли

The key role of GNSS for monitoring geodetic parameters of the Earth

Kuzin S.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Global navigation satellite systems (GNSS) are a fundamental tool for monitoring geodetic parameters of the Earth, building and constantly monitoring the Earth's reference system and connecting measurements of various satellite geodetic technologies. GNSS consist of a ground segment (GNSS receivers) and an orbital grouping (navigation satellites of the system). The microwave range of GNSS signals allows using these systems in all weather conditions, and the two-frequency carriers allow, to a large extent, eliminating the ionospheric delay of signal propagation. In addition to performing basic geodetic definitions, GNSS can also be used to solve social and other positional measurements that require high accuracy. In this article the author discusses the main tasks solved by GNSS, defines the requirements for the accuracy of navigation systems products, and provides directions for the development of the ground and orbital parts of GNSS taking into account the needs of the international geodetic community.

Keywords: Global Navigation Satellite Systems (GNSS), accuracy and directions of GNSS development, geodetic parameters of the Earth

DOI: 10.51194/INASAN.2021.6.1.003

1. Введение

К основным геодезическим параметрам Земли относятся: прецессия и нутация Земли, движение полюса Земли, универсальное время, длительность суток, координаты и скорости движения пунктов на поверхности нашей планеты, движение геоцентра, гравитационное поле Земли, тропосфера и ионосфера Земли. В последние два десятилетия высокоточные и быстрые оценки указанных параметров получают с помощью современных методов космической геодезии, среди которых ГНСС занимают ключевое положение вследствие высокой точности, всепогодности, легкости установки и обслуживания приемников системы и доступности измерений. Регистрация ГНСС измерений происходит в автоматическом режиме и получаемые данные доступны пользователям в близком к реальному масштабу времени. Современные приемники ГНСС разрабатываются с учетом требований многосистемности и многофункциональности, т. е. приемники наблюдают спутники и сигналы всех существующих навигационных систем.

2. Задачи, решаемые ГНСС, и требования к точности продуктов навигационных систем

Основными задачами, решаемыми с помощью ГНСС, являются:

- участие в создании и поддержке Международной земной системы отсчета (ITRF);
- определение параметров вращения Земли (ПВЗ);
- изучение тропосферы и ионосферы нашей планеты;
- мониторинг движения геоцентра;
- определение гравитационного поля Земли;

Таблица 1: Основные требования к продуктам ГНСС

Продукты (Final)	Точность	Частота получения решений	Разрешение	Задержка получения продуктов
Недельное решение координат станций. Скорости станций	X: 3.0 мм Y: 3.0 мм Z: 6.0 мм X: 2.0 мм/год Y: 2.0 мм/год	Еженедельно	1 неделя	11–17 дней
Движение полюса. Скорость движений полюса. Длительность суток	X: ~10 мкс дуги Y: ~10 мкс дуги ~150 мкс дуги в сутки 10 мкс дуги	1 раз в неделю	Еженедельно	11–17 дней
Зенитная тропосферная задержка распространения	4 мм	Ежедневно	5 минут	< 4 недель
Общая концентрация электронов в ионосфере	2–8 TECU	Еженедельно	2 часа; 5° (долгота) 2.5° (широта)	~11 дней
Движение геоцентра	X, Y: 2.0 мм Z: 3.0 мм	1 раз в неделю	Еженедельно	11–17 дней

- высокоточная передача (сравнение) времени и частоты;
- мониторинг глобальной тектоники плит и деформационных явлений;
- мониторинг перемещений локальных областей суши после и во время землетрясений (ГНСС сейсмология);
- привязка датчиков мареографов к глобальной системе отсчета посредством колокации;
- прецизионное определение орбит низкоорбитальных космических аппаратов.

В табл. 1 приведены основные требования к продуктам ГНСС¹.

3. Направления развития ГНСС

В настоящее время более 500 станций ГНСС, расположенных в более 80-ти стран мира, позволяют осуществлять точный мониторинг глобальной системы отсчета и доступ к системе отсчета в любое время и в любом месте на Земле. Без свободного доступа к сигналам GPS впечатляющее развитие геодезии за последние два десятилетия было бы невозможным. Наземные сети измерений ГНСС имеют решающее значение для позиционирования. В частности, они позволяют осуществлять мониторинг вулканов, землетрясений, тектонически активных регионов и оползневых участков.

3.1. Направления развития наземных средств ГНСС

Для решения вышеотмеченных задач сеть станций ГНСС должна состоять из нескольких тысяч ГНСС станций со следующими характеристиками [1]:

- все станции должны быть оборудованы современными приемниками, отслеживающими все спутники ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, Бэйдоу и аналогичных навигационных спутниковых систем, находящихся на стадиях разработки). Для достижения максимальной точности и надежности определения

¹<http://www.igs.org/products>

геодезических параметров Земли должны быть отслежены все доступные спутники различных систем ГНСС. Сбор данных от нескольких систем ГНСС решает вопрос независимости контроля геодезических параметров Земли от отдельных систем. Приемники будут регистрировать все основные кодовые и фазовые измерения на всех несущих частотах;

- станции должны иметь равномерное глобальное распределение по поверхности Земли и плотно охватывать все основные тектонические плиты. В случае крупного землетрясения последствия для глобальной системы отсчета должны быть известны и доступны в режиме, близком к реальному времени;
- основные станции (т. е. станции, расположенные совместно с оборудованием других космических геодезических технологий) должны быть оснащены более чем одним приемником и антенной для разрешения проведения модернизации оборудования без потери точности и непрерывности временных рядов измерений;
- все РСДБ (радиоинтерферометры со сверхдлинной базой), лазерные и большинство DORIS станций должны быть оборудованы ГНСС приемниками;
- ГНСС станции должны быть оборудованы каналами передачи данных в режиме реального времени и возможностью сбора данных с частотой дискретизации несколько десятков Гц;
- приемники ГНСС должны идеально управляться и быть подключены к ультра-стабильным генераторам времени и частоты, особенно к генераторам лабораторий службы времени.

Сеть ГНСС станций будет иметь ключевое значение для взаимосвязи (путем колокации инструментов) со всеми другими наземными геодезическими сетями и обеспечивать положение всех датчиков системы контроля геодезических параметров Земли в уникальной глобальной системе координат.

3.2. Развитие орбитальной группировки ГНСС

В настоящий момент на стадии эксплуатации находятся 6 систем ГНСС². Одни из этих систем полностью развернуты (GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), NavIC (Индия)), другие находятся на этапе завершения развертывания (GALILEO (Евросоюз), БЭЙДОУ (Китай), QZSS (Япония)). Рассмотрим перспективы развития отдельных орбитальных группировок ГНСС.

GPS

Выделяют два важных этапа развертывания системы GPS³ — фазу первоначальной работоспособности и фазу полной работоспособности. Этап первоначальной работоспособности начался в 1993 г., когда в составе орбитальной группировки насчитывалось 24 КА (космических аппарата) различных модификаций (Block I/II/IIA), готовых к использованию по целевому назначению. Переход в режим полной работоспособности состоялся в июле 1995 после завершения всех летных испытаний, хотя фактически система начала предоставлять услуги в полном объеме с марта 1994 г. Таким образом, GPS является полностью работоспособной уже в течение более чем двух десятилетий, при этом на протяжении всей своей истории GPS постоянно модернизировалась с целью удовлетворения требований различных категорий потребителей как гражданских, так и военных.

Текущий третий этап модернизации GPS предполагает разработку и производство космических аппаратов следующего поколения (Block III), которые в сочетании с усовершенствованным наземным комплексом управления и навигационной аппаратурой потребителей обеспечат улучшенные характеристики в части помехозащищенности, точности, доступности и целостности координатно-временного и навигационного обеспечения. Штатная орбитальная группировка GPS состоит из 32 основных космических аппаратов, расположенных на шести круговых орбитах, обозначаемых латинскими буквами от А до F. Дополнительно на некоторых орбитах может находиться один или два резервных КА, предназначенных для сохранения параметров системы при выходе из строя основных КА. Наклонение орбитальных плоскостей 55° , долготы восходящих узлов различаются на 60° . Высоте орбит ~ 20200 км соответствует период обращения 11 ч 58 мин, т. е. орбиты космических аппаратов GPS являются синхронными.

Основной задачей КА Block III является предоставление навигационных услуг с помощью нового навигационного радиосигнала L1C и повышение точности эфемеридно-временной информации, доступности навигационного радиосигнала, мощности излучения, а также увеличение срока активного существования. В сентябре 2018 г. ВВС США заключили дополнительный контракт с компанией Lockheed Martin. Этот

²<http://mgex.igs.org/>

³<https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/>

контракт стоимостью 7.2 млрд долл. на изготовление 22 НКА (навигационных космических аппаратов) стал результатом сложного конкурентного процесса. НКА GPS-III^F, изготовленные на основе базовых требований НКА GPS-III, получают ряд улучшений и обеспечат дополнительные возможности в различных сферах. Функция региональной военной защиты обеспечивает повышенную помехозащищенность. Новая полезная нагрузка поиска и спасания обеспечит большую оперативность при проведении поисково-спасательных операций. Панель лазерных отражателей позволит проводить высокоточные лазерные измерения. А использование унифицированного канала связи S-диапазона позволит консолидировать частоты, на которых передается телеметрия, данные слежения и команды управления. Наконец, на борту НКА будет установлена обновленная полезная нагрузка системы обнаружения ядерных взрывов, оптимизированная по габаритам и массе.

ГЛОНАСС

Система ГЛОНАСС в настоящее время полностью развернута и состоит из 26 спутников типа «ГЛОНАСС-М» (24 аппарата используются по назначению, 2 находятся в резерве). В разработке находится новое поколение космических аппаратов типа «ГЛОНАСС-К» и «ГЛОНАСС-К2», которые в ближайшее время должны быть выведены на орбиту. Основными направлениями развития системы ГЛОНАСС являются⁴:

1. Развитие структуры орбитальной группировки ГЛОНАСС в части ее расширения и создания дополнений на других орбитах.
2. Переход к использованию навигационного космического аппарата нового поколения «Глонасс-К2» с повышенными тактико-техническими характеристиками.
3. Развитие наземного комплекса управления системы ГЛОНАСС, включая усовершенствование эфемеридно-временной информации системы ГЛОНАСС.
4. Создание и развитие функциональных дополнений:
 - широкозонной системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ-КФД) навигационных полей ГНСС;
 - глобальной дополняющей системы высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации (СВО ЭВИ) в реальном времени для гражданских потребителей.

Развитие системы ГЛОНАСС в целях обеспечения постоянно растущих требований потребителей и конкурентоспособности системы в основном определяется тактико-техническими характеристиками космического сегмента ГЛОНАСС.

GALILEO

Два первых навигационных КА системы GALILEO были запущены 20 октября 2011 с помощью ракеты «Союз-СТБ» с космодрома Куру. Технология выведения КА GALILEO предполагает групповые запуски по два КА на российской ракете-носителе «Союз» и по четыре КА на европейской ракете «Ариан-5».

Орбитальное построение GALILEO предполагает, что спутниковая группировка будет состоять из 30 КА на трех круговых орбитах высотой ~ 23222 км, периодом обращения 14 ч, наклоном 56° . По целевому назначению используются 24 КА, по два КА в каждой орбитальной плоскости являются резервными. Такая конфигурация группировки была выбрана, исходя из гарантированного обеспечения требований по точности и доступности сигналов GALILEO практически в любой точки поверхности Земли при минимальных затратах на коррекцию орбиты за время существования космического аппарата.

К 2020 г. ожидалось обеспечение полной операционной готовности системы, однако данной цели не удалось достичь вовремя. В настоящий момент на орбите находятся 26 спутников системы, 22 из которых используются по целевому назначению и 4 спутника находятся в резерве.

Последние несколько лет ведутся работы по предварительной отработке новых технологий, которые будут использоваться в системе GALILEO⁵ второго поколения в части оборудования для платформы и полезной нагрузки, системных характеристик и алгоритмов обработки данных. Еврокомиссия, с участием стран-членов ЕС, составила план развития и приняла решения в части его реализации. В связи с этим Европейское космическое агентство запустило процедуру закупки первой «переходной партии» спутников для отработки как усовершенствованных, так и новых технологий. К усовершенствованиям системы относятся улучшения в области более быстрой обработки сигналов системы, снижения потребляемой мощности

⁴<https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/>

⁵<https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/>

приемников, использования новых бортовых синхронизирующих устройств, создания межспутниковой радиолинии, электрической двигательной установки и перенастраиваемой полезной нагрузки с возможностью перераспределения мощности.

К концу 2019 г. были заключены контракты на изготовление «переходной партии» спутников с началом их запусков в 2025 г. и развитие наземного комплекса управления.

БЕЙДОУ

Космический сегмент системы БЕЙДОУ представляет собой орбитальную группировку смешанного типа, состоящую из КА на орбитах 3 типов. Предполагалось, что к 2020 г. орбитальная группировка БЕЙДОУ будет состоять из 35 КА, из которых 5 КА Beidou-G должны находиться на геостационарной орбите (точки 58.75° в.д., 80° в.д., 110.5° в.д., 140° в.д. и 160° в.д.), 27 КА Beidou-M — на средней круговой орбите (высота ~ 21528 км, период обращения 12 ч 53 мин, наклонение 55°) и 3 КА Beidou-IGSO — на геосинхронных наклонных высоких орбитах в трех плоскостях с высотой орбит ~ 35786 км и наклонением 55° , подспутниковые точки которых движутся на поверхности Земли по одной трассе в форме восьмерки, ось симметрии которой находится на долготе 118° в.д.

Китай в течение 2019 г. произвел запуск 10 спутников навигационной системы. С 2000 г. Китай создает собственную систему глобальной навигации БЕЙДОУ⁶, которая к настоящему моменту распространяется почти на всю территорию страны (этап Beidou-1) и покрывает часть Азиатско-Тихоокеанского региона (Beidou-2). В 2012 г она стала доступна для коммерческого использования. В настоящее время система развернута в полном объеме и состоит из 49 космических аппаратов, 44 из которых используются по назначению и 5 находятся в резерве (Beidou-3).

QZSS

Японская квазизенитная спутниковая система QZSS (Quazi-Zenith Satellite System) — это региональная навигационная спутниковая система, предназначенная для обслуживания потребителей в Тихоокеанско-Азиатском регионе. В программе развития системы QZSS⁷ планировалось создание к 2018 г. группировки из 4 космических аппаратов (КА), 3 из которых (КА QZS1,2,3) предполагалось разместить на квазизенитных орбитах (наклонение $43^\circ \pm 4^\circ$ к экватору) в трех орбитальных плоскостях. При этом орбитальные плоскости будут разнесены на 120° . Таким образом, каждый из спутников должен находиться над территорией Японии в течение 8 часов каждые сутки (угол места составляет минимум 60°). 1 КА планируется разместить на геостационарной орбите. К настоящему времени реализация первоначально намеченной программы задерживается. В проект создания системы также заложена возможность последующего расширения группировки до 7 КА.

NavIC

В мае 2006 г. Индия утвердила программу создания региональной навигационной спутниковой системы (Indian Regional Navigation Satellite System — IRNSS), которая должна обеспечить автономное навигационно-временное обеспечение на Индийском полуострове. Первый НКА IRNSS-1a запущен 8 июля 2013 г. Формирование штатной орбитальной группировки из 7 космических аппаратов закончено в 2016 г. В 2016 г. система получила новое название — NavIC.

Система NavIC⁸ является первой независимой навигационной системой, предоставляющей потребителям с одночастотной аппаратурой ионосферные поправки на основе параметров ионосферной точечной сетки, обеспечивая тем самым точность определения местоположения потребителя, сопоставимую с точностью, получаемой при использовании двухчастотной аппаратуры. На данный момент 5 аппаратов системы находятся на геосинхронной орбите и 3 аппарата на геостационарной.

4. Заключение

В данной работе автором рассмотрены главные задачи, решаемые ГНСС, определены требования к точности продуктов навигационных систем и приведены направления развития наземной и орбитальных частей ГНСС, учитывая потребности мирового геодезического и научного сообщества. ГНСС имеют решающее значение для реализации земной системы отсчета, многочисленных приложений наук о Земле и наблюдений Земли из космоса. В настоящее время доступно около 100 спутников различных ГНСС, что обеспечивает новый уровень качества позиционирования и точности. Это окажет фундаментальное влияние на мониторинг

⁶<https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/>

⁷<https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/>

⁸<https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/>

геодезических параметров Земли, начиная от установления референционной системы отсчета до прикладных применений ГНСС (атмосферного зондирования, рефлектометрии и скаттерометрии). Следует отметить, что для того, чтобы система контроля геодезических параметров Земли максимально эффективно использовала комбинацию отдельных систем ГНСС, доступных для гражданских применений, наземные приемники сети ГНСС станций должны поддерживать возможность регистрации сигналов всех ГНСС систем для одноименных моментов времени.

Кроме того, чтобы соединить ГНСС и лазерные сети измерений, необходимо предусмотреть возможность установки лазерных ретрорефлекторов на всех новых спутниках различных систем ГНСС. Также необходимо подчеркнуть, что все спутники ГНСС ГЛОНАСС и GALILEO уже оснащены лазерными светоотражателями.

Список литературы

1. A. Craddock and G. Johnston, in *GPS World*, volume 6, 50 (2018).

Сколько межзвездных гостей в Солнечной системе?

Шустов Б.М.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

По результатам краткого обзора наблюдений вошедших в Солнечную систему межзвездных пылинок, метеороидов и более крупных тел и на основе моделей, описывающих спектры масс таких тел, отмечен огромный разброс (много порядков величины) в оценках отношения η потока межзвездных частиц к общему потоку частиц в окрестности Земли и в целом в Солнечной системе. Этот разброс означает, что современные возможности не позволяют определенно ответить на вопрос в заголовке статьи. При анализе результатов наблюдений необходимо учитывать характер зависимости отношения η от размера частиц r , т. е. $\eta(r)$. Эта зависимость определяется процессами генерации и динамической эволюции населения малых тел в Солнечной системе и за ее пределами.

Ключевые слова: межзвездные астероиды, кометы, метеороиды

How many interstellar visitors are there in the Solar System?

Shustov B.M.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

According to the results of a brief review of observations included in the Solar system, interstellar dust, meteoroids and larger bodies, and on the basis of models describing the spectra of the masses of these bodies, we mark a huge spread (many orders of magnitude) in estimates of the relationship η of the flow of interstellar particles to the total particle flux near the Earth and in the whole Solar system. These differences mean that modern capabilities do not allow us to definitely answer the question in the title of the article. When analyzing the results of observations, it is necessary to take into account the nature of the dependence of the ratio η on the particle size r , i.e. $\eta(r)$. This dependence is determined by the processes of generation and dynamic evolution of the population of small bodies in the Solar system and beyond.

Keywords: interstellar asteroids, comets, meteoroids

DOI: 10.51194/INASAN.2021.6.1.004

1. Межзвездные метеороиды

В Солнечной системе в каждый момент находится немало гравитационно несвязанных с ней объектов. Большая часть из них приходит из межзвездного пространства и уходит через несколько десятков лет туда же. Некоторое количество маломассивных объектов постоянно выбрасывается из Солнечной системы. Например, в [1] показано, что до 15% астероидов, сближающихся с Землей, выбрасывается из Солнечной системы на шкале времени ~ 5 млн. лет. Эти тела, выходя на межзвездные орбиты, пополняют население межзвездных путешественников.

Наибольшее внимание в последние годы привлечено к относительно крупным телам. Такие тела межзвездного происхождения были открыты совсем недавно. В октябре 2017 г. на основе данных телескопа Pan-STARRS был открыт межзвездный астероид 1I/ʻOumuamua (электронный циркуляр Центра малых планет MPEC 2017-U183: A/2017 U1). Оумуамуа считался кометой, но, спустя неделю после открытия, он был переклассифицирован как астероид [2]. Считалось (и считается), что большинство относительно крупных межзвездных объектов (МЗО) — это кометоподобные тела (кометезимали, планетезимали), выброшенные из других планетных систем. Поскольку было ясно, что подобные тела будут открываться во все большем количестве, Центр Малых Планет (ЦМП) ввел в обозначения новый класс I (interstellar), в который включаются все межзвездные пришельцы — и кометы, и астероиды. Следующий объект из этого класса был открыт менее чем через два года. Первая межзвездная комета 2I/Borisov (предварительное обозначенный C/2019Q4(Borisov)), была открыта в конце августа 2019 г. (см. подробнее в [3]). В [4] сообщается о том, что, в результате анализа болидных событий по каталогу CNEOS, идентифицирован болид (событие 2014-01-08 17:05:34 UTC), обусловленный входом в атмосферу метеороидного тела размером 0.45 м. Гиперболичность орбиты определена с уверенностью 99.999%. На момент написания данной статьи работа [4], направленная в ApJL, еще находится на рассмотрении.

Но все-таки крупных тел (астероидов и комет) среди этих межзвездных гостей немного, а вот количество метеороидов, естественно, гораздо больше. Сначала напомним понятие метеороида. До последнего времени граница между понятиями астероида и метеороида и между понятиями метеороида и межпланетной пыли была весьма размытой (см. обсуждение в [5]). В апреле 2017 г. комиссия F1 Международного астрономического союза приняла решение (см. [6]) использовать в дальнейшей работе следующий термин: метеороид — это твердый природный объект размером примерно от 30 мкм до 1 м, движущийся в межпланетном пространстве или приходящий из него.

Зачем нужно знать, сколько метеороидов (вообще малых тел) приходит в Солнечную систему из межзвездного пространства? Среди вопросов, на которые можно попытаться найти ответ, изучая статистику межзвездных малых тел:

- уточненная оценка баланса вещества в Солнечной системе,
- оценка распределения вещества (малых тел) в межзвездном пространстве,
- анализ динамических факторов, обуславливающих особенности распределения малых тел в межзвездном пространстве и в Солнечной системе.
- оценка опасности со стороны высокоскоростных тел межзвездного происхождения.

В недавнем интересном обзоре, посвященном межзвездным метеороидам [7], отмечается еще один аспект — обнаружение и анализ потоков достаточно крупных межзвездных частиц (метеороидов) может внести вклад в изучение осколочных (debris) дисков вокруг других звезд в дополнение к чисто астрономическим наблюдениям.

Идея, заключающейся в том, что в Солнечной системе находится довольно много межзвездных частиц твердого вещества, уже почти сто лет. С 20-х гг. XX в. и до его середины доминировало мнение, что большинство метеоров образуется в результате входа в атмосферу межзвездных частиц [8, 9, 10]. Но постепенно это представление было отвергнуто, так как было показано, что главный параметр — скорость частиц — по оптическим наблюдениям метеоров определялась неверно, а ведь межзвездные тела идентифицируются именно по их высоким скоростям, превышающим локальную скорость убегания из Солнечной системы. Этот исторический факт показывает, что технические вопросы методик определения параметров метеорных тел имеют определяющее значение. Для частиц различных размеров, естественно, применяются различные методы.

В диапазоне размеров 0.05–10 мкм микрочастицы регистрируются только с помощью специальных датчиков, установленных на космических аппаратах (КА). Конечно, иногда регистрируются и более крупные частицы, но площади датчиков столкновений слишком малы, чтобы набрать существенную статистику таких столкновений. Частицы размером от 10 мкм до нескольких мм регистрируются с помощью радаров, когда такие частицы входят в атмосферу и оставляют след из ионизованного вещества атмосферы и собственно частицы. Радары позволяют за час пронаблюдать радиометеоры на собирающей площади слоя атмосферы на высоте сгорания частиц 80–110 км в несколько сотен квадратных км (в англоязычной литературе эту величину называют Effective Atmospheric Collecting Area). Большая собирающая площадь позволяет наблюдать гораздо более разреженные по сравнению с пылевым компонентом потоки крупных метеорных частиц. Частицы крупнее 100 мкм и до самых крупных метровых тел могут наблюдаться в оптическом диапазоне, поскольку такие события производят достаточно фотонов для регистрации оптическими камерами. Снова работает фактор масштаба — собирающая площадь составляет сотни тысяч квадратных км за час (для all-sky камер) и это позволяет регистрировать более редкие события входа в атмосферу крупных тел.

Столкновения КА с микрочастицами, движущимися с очень высокими (межзвездными) скоростями, отмечались и отмечаются практически с начала космической эры, хотя систематическое изучение таких событий началось несколько позднее. В качестве примера отметим несколько таких исследований. В [11] рассмотрены особенности движения межзвездных пылевых частиц в Солнечной системе и проведено сравнение модельных предсказаний с данными регистрации соударений датчиками, установленными на космических аппаратах. Исследования межзвездной пыли проводились в ходе ряда космических экспериментов. Частицы межзвездной пыли были идентифицированы с помощью измерений на борту КА Ulysses, Galileo, Cassini и др. (см. обзоры [12, 7]). Межзвездные частицы отличаются от пыли Солнечной системы скоростью и направлением удара. Большая продолжительность миссии Ulysses позволила получить значительный объем данных. В проекте Cassini 36 микрочастиц (из-за особенностей технологии анализатора пыли регистрировались лишь частицы массой $10^{-19} - 5 \times 10^{-16}$ кг) были идентифицированы как межзвездные [13]. К сожалению, проект STARDUST, одной из главных целей которой был сбор именно межзвездной пыли, не принес желаемых результатов, что в [14] объясняется непреодоленными трудностями интерпретации следов высокоскоростных столкновений с аэрогелем пылевой ловушки, и хотя в [15] сообщается о возможном обнаружении семи межзвездных частиц (ключевое слово — возможное), отмечается, что оцениваемый поток таких частиц много ниже, чем по предсказаниям модели, основанной на наблюдениях на борту КА Ulysses и Galileo. К сожалению, наиболее современный датчик Space Debris Sensor (NASA), предназначенный для регистрации ударов частиц размером от 0.05 мкм до 1 мм (датчик позволяет с высокой точностью определять энергию, траекторию и, что весьма важно, скорость частиц), который был установлен на борту МКС в 2018 г. так и не дал результатов из-за технических трудностей [16]. В целом, можно заключить, что статистика данных о межзвездных частицах в потоке микрометеороидов, регистрируемых датчиками соударений на КА, пока не слишком полна.

Технология радарных наблюдений метеоров развита в ряде стран (см. в обзорах [17, 7]). Количество регистраций метеоров радарными средствами измеряется многими миллионами. В ряде работ (см., например, [18, 19]) сообщается о довольно большой доле межзвездных идентификаций среди выявленных гиперболических метеорных орбит. В [20, 21] на основе анализа метеорных орбит, перечисленных в различных каталогах метеорных орбит, полученных в результате фотографических, телевизионных и радиолокационных измерений, сделан вывод о том, что 5–15% метеорных тел находились на гиперболических орбитах. По мнению авторов этих работ, анализ элементов более чем 700 гиперболических метеорных орбит доказывает, что существуют метеороиды с гелиоцентрическими скоростями, превышающими параболическую скорость на 5–10 км/с (и даже больше), и таких метеороидов может быть более 20% от числа гиперболических. Все же столь высокая доля межзвездных частиц требует дальнейшего подтверждения и анализа примененных методик (как отмечено в [22]). Представляется более правильным придерживаться более осторожных и надежных (скажем, на уровне 3σ) оценок.

В недавней работе [23] приведены результаты анализа радарных наблюдений метеоров с радаром SMOR (Canadian Meteor Orbit Radar) за период 2012–2019 гг. Общий охват (произведение площади наблюдаемой области на время наблюдений) составил 7×10^6 км² часов, а количество анализируемых орбит метеорных тел превысило 11 млн. Показано, что на уровне 3σ только пять событий можно считать межзвездными метеорами. Так что и здесь можно заключить, что разброс данных о доле регистраций межзвездных частиц очень велик.

Регистрации межзвездных метеороидов в оптическом диапазоне тоже дают довольно большой разброс в оценках доли межзвездных частиц. В [24] сообщается о наблюдениях метеоров на Канадской автоматизированной метеорной обсерватории (САМО) в период с июня 2009 г. по август 2010 г. Предельная величина обнаружения $+5^m$ в R-полосе, что соответствует предельной массе метеороида $\sim 2 \times 10^{-7}$ кг. Точность определения траектории была довольно высокой: по скорости лучше 1.5% и 0.4° по направлению движения. Всего были измерены орбиты 1739 метеоров. Из них только два имели скорость на уровне 3σ выше гиперболического предела. Детальное изучение привело авторов к выводу о том, что немногие идентифицированные события, скорее всего, являются результатом ошибок измерения.

В обзоре [7] приведен результат анализа фотографических наблюдений, собранных в Центре данных о метеорах MAC (IAU Meteor Data Centre), и сделана оценка верхнего предела потока межзвездных метеорных тел f_{ISP} , массы которых лежат в диапазоне $10^{-4} - 5 \times 10^0$ кг, $f_{ISP} < 10^{-18}$ м⁻²с⁻¹. Там же приведены результаты оценки верхнего предела величины потока по видеонаблюдениям, выполненным разными авторами. Этот верхний предел на два порядка выше установленного из фотографических наблюдений, но авторы отмечают высокую степень неопределенности результатов, поскольку наблюдались лишь единичные события: два наблюдаемых события были вызваны частицами массой порядка 10^{-7} кг с гелиоцентрическими скоростями выше 48 км/с.

Согласно [25] в 2006 г. на 6-м телескопе САО РАН был зарегистрирован спектр слабого метеора. Уверенно отождествлены линии FeI и MgI, OI, NI и полосы молекулярного азота N₂. Скорость вторжения метеорного тела в атмосферу Земли, оцененная по лучевой скорости, составила 300 км/с. Размер тела составлял десятые доли миллиметра. Радиант траектории метеора совпадает с положением апекса движения Солнечной системы к центроиду Местной группы галактик. Сделан вывод, что, вероятно, эта метеорная частица имеет внегалактическое происхождение.

Отметим, что критерий высокой (сверхгиперболической) скорости для выделения межзвездных частиц может не работать для очень мелких частиц, на движение которых сильно сказываются негравитационные факторы (силы давления излучения, давления солнечного ветра, сила Лоренца). Например в работе [26] показано, что из-за негравитационных эффектов межзвездные метеороиды в некоторых случаях могут иметь почти нулевые скорости вблизи орбиты Земли и они не будут соответствовать критерию высоких скоростей межзвездных метеороидов.

2. О населенности Солнечной системы межзвездными путешественниками

Важной характеристикой ансамбля малых тел является распределение тел по размеру (или по массе). Обычно в метеорной астрономии используют определяемое из наблюдений распределение метеороидов по массе. В дифференциальной форме его, как правило, описывают степенным законом: $dn \propto m^{-s} dm$, где m — масса объекта, dn — количество объектов в интервале масс $[m, m + dm]$. Величину s называют индексом массы метеорных тел. Для того, чтобы узнать количество объектов в интервале масс $[m_{\min}, m_{\max}]$, нужно проинтегрировать это дифференциальное выражение в данном интервале масс. Поскольку функция степенная, это сделать очень просто при фиксированном значении s . В [27], где по результатам краткого обзора теоретических и наблюдательных работ пранализированы формы (наклоны) спектров масс населений малых тел Солнечной системы, включая космический мусор, показано, что, в целом, формы спектров в дифференциальном виде близки к $dn \propto m^{-2} dm$. Отклонения от этого вида отражают влияние факторов, доминирующих при образовании и дальнейшей эволюции населений малых тел.

В очень широком диапазоне масс малых тел зависимость числа объектов естественного происхождения в ближнем космосе от их размера (массы) можно вывести из данных, представленных на рис. 10 работы [28], где показано число столкновений частиц различной массы (размера) с Землей за год. Видно, что значение показателя степени s в разных интервалах масс (размеров) довольно сильно отличается и составляет приблизительно 1.8 в интервале масс $10^{-20} - 10^{-17}$ кг, а также для тел массой более 1 кг; 1.3 в интервале масс $10^{-17} - 10^{-10}$ кг и 2.0 в интервале $10^{-10} - 10^0$ кг. Так что, если мы хотим узнать, сколько малых тел Солнечной системы заключено в диапазоне масс $[m_{\min}, m_{\max}]$, нужно провести интегрирование выражения:

$$N(m_{\min}, m_{\max}) = C \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} m^{-s(m)} dm, \quad (1)$$

где C — нормировочный множитель. Значение показателя s нужно выбирать в зависимости от диапазона масс. Аналогично можно описать распределение метеороидов по размеру. Отметим, что поскольку в диапазоне масс метеороидов от $m_{\min} = 10^{-10}$ до $m_{\max} = 10^0$ кг значение показателя s примерно постоянно и близко к 2.0, выражение 1 становится совсем простым. Главная проблема — определить значение нормировочного множителя C . Это нужно делать по некоей полной выборке наблюдательных данных. Например, если считать, что с помощью внеатмосферных средств регистрируются все крупные болидные события (см. материал NASA <https://www.nasa.gov/jpl/bolide-events-1994-2013/>), вызванные входом в атмосферу тел массой более 10 кг, то при достаточном наборе данных (в настоящее время зарегистрировано около тысячи событий) можно оценить C . Но чаще используются некоторые модели распределения частиц по размерам с привязкой лишь к нескольким событиям. В [3] сделан вывод о том, что в Солнечной системе, точнее в окосолнечной сфере радиусом 50 а.е., в каждый момент времени может находиться около 50 межзвездных тел размером > 50 м. Это согласуется с некоторым средним по работам других авторов, хотя в оценках, данных в этих работах, наблюдается значительный разброс.

Как ясно из раздела 1, надежно зафиксированных событий входа в атмосферу малых тел межзвездного происхождения немного. Поэтому прямое определение спектра масс таких тел — трудная задача. По-видимому, разумно сделать предположение, что спектр масс межзвездных метеороидов близок по виду к спектру масс метеороидов Солнечной системы. Еще одно замечание — из выражения (1) мы получаем число тел в данном диапазоне масс, а в наблюдениях определяют плотность потока частиц, т. е. количество метеороидных тел, регистрируемых в единицу времени на единицу эффективной (собирающей) площади атмосферы. В [28] оценен поток тел, сталкивающихся с Землей, за год. Чтобы получить плотность потока метеороидов на 1 км^2 поверхности атмосферы (на высоте 100 км) за час, нужно делить соответствующее значение из [28] на переходный коэффициент 4.6×10^{12} .

В табл. 1 собраны оценки доли η межзвездных метеороидов (по отношению ко всем метеороидам) в Солнечной системе. Не во всех указанных в таблице работах эта величина дана напрямую. Иногда приходилось рассчитывать ее, сравнивая приведенные в работе потоки межзвездных метеороидов и общий поток метеороидов для данного порогового значения массы (размера) этих тел из [28].

Таблица 1: Оценки доли межзвездных метеороидов в Солнечной системе.

Доля межзвездных метеороидов η	Ссылка	примечание
1×10^{-3}	[19]	радарные наблюдения
$\sim 5 \times 10^{-11}$	[23]	радарные наблюдения для предельной массы 10^{-7} кг
$< 2 \times 10^{-4}$	[24]	оптические наблюдения (рассчитано из сравнения оценки потока метеороидов массой $> 2 \times 10^{-7}$ кг $< 2 \times 10^{-4} \text{ км}^{-2} \text{ час}^{-1}$ с данным из [28])
$> 3 \times 10^{-8}$	[3]	рассчитано по модели потока метеороидов радиуса $r \geq 50$ м согласно [3] и данным из [28]
$< 5 \times 10^{-4}$	[29]	рассчитано по отношению к числу метеороидов радиуса $r = 0.45$ м по [28]

Как видно из табл. 1, от работы к работе разброс значений η очень велик. Представляются более реалистичными консервативные оценки. Еще более странное впечатление оставляет сравнение результатов двух главных в контексте данной статьи работ: [24, 28]. На рис. 1, основа которого взята из [24], нанесена кривая потока всех метеороидов в окрестности Земли по данным из [28]. Поскольку единицы измерения потоков

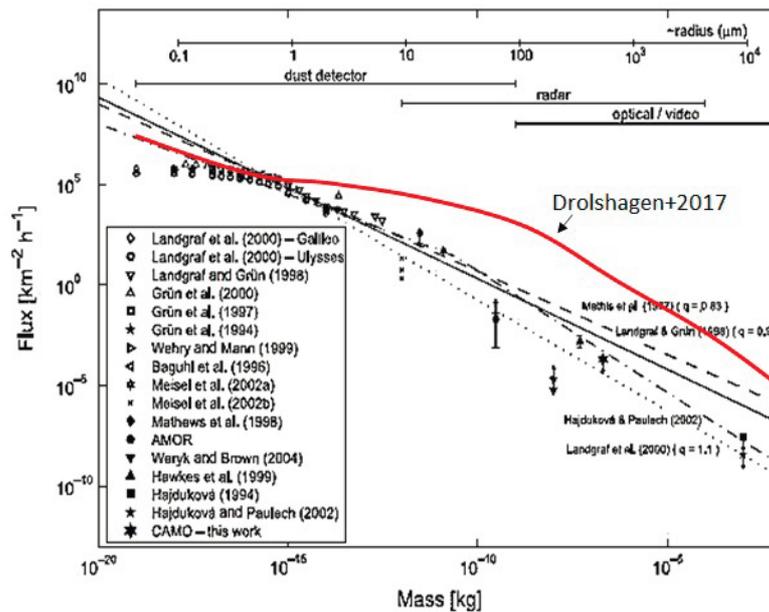


Рис. 1: Потоки межзвездных метеороидов (рисунок из [24]) и поток всех метеороидов, сталкивающихся с Землей (согласно [28]), поделенный на переходный коэффициент 4.6×10^{12} , (показан жирной красной линией).

в этих двух работах разные, кривая дана со сдвигом по ординате на 12.66 порядков, что соответствует переходу от потока на всю площадь поверхности Земли за год к потоку в единицах $\text{км}^{-2} \text{с}^{-1}$.

Кривая потока всех метеороидов идет выше на 3–4 порядка кривой, соответствующей потоку межзвездных метеороидов (что логично), а вот для мелких частиц массой менее 10^{-12} кг, т.е. за пределами рабочего диапазона для метеорных радаров, относительная доля числа межзвездных микрометеороидов (пылинок) растет и достигает 100%! Конечно, это нереалистично. Не анализируя причины этих странностей, подчеркнем лишь, что нужно очень критично относиться к методикам выделения межзвездных метеороидов из общего потока.

3. Выводы

Проведенный краткий анализ наблюдений межзвездных пылинок, метеороидов и более крупных тел, а также моделей, описывающих спектры масс таких тел, показывает, что ответить на вопрос, поставленный в названии данной статьи, пока что невозможно с какой-либо разумной степенью надежности. Слишком велик разброс (много порядков величины) в оценках отношения η потока межзвездных частиц к общему потоку частиц в Солнечной системе. Мнение автора данной статьи склоняется к более консервативным (низким) оценкам отношения η . При анализе результатов наблюдений необходимо учитывать характер зависимости η от размера r метеорных тел, определяемый процессами генерации и эволюции населения малых тел в Солнечной системе и за ее пределами. В любом случае, нужны новые наблюдательные программы.

Список литературы

1. R. V. Zolotarev, B. M. Shustov, and V. I. Korchagin, *INASAN Science Reports*, **5**, 225, 2020.
2. K. J. Meech, R. Weryk, M. Micheli, J. T. Kleyna, et al., *Nature*, **552**, 378, 2017.
3. G. Borisov and B. Shustov, *Solar System Research*, **55**, 1, 2021.
4. A. Siraj and A. Loeb, *arXiv e-prints*, arXiv:1904.07224, 2019.
5. V. Puchkov, ed., *Asteroidno-kometnaya opasnost': strategiya protivodeistviya*, FGBU VNII GOChS (FZ) (2015).
6. D. Koschny and J. Borovicka, *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, **45**, 91, 2017.
7. J. Hajduková, Mária, V. Sterken, and P. Wiegert, *Interstellar Meteoroids*, 235 (2019).
8. F. G. Watson and H. Shapley, *Annals of Harvard College Observatory*, **105**, 623, 1937.
9. J. Hoppe, *Astronomische Nachrichten*, **274**, 226, 1944.
10. E. J. Opik, *Irish Astronomical Journal*, **1**, 80, 1950.
11. J. L. Bertaux and J. E. Blamont, *Nature*, **262**, 263, 1976.
12. I. Mann and E. K. Jessberger, *The In-Situ Study of Solid Particles in the Solar System*, volume 815, 233–257 (2010).
13. N. Altobelli, F. Postberg, K. Fiege, M. Trieloff, et al., *Science*, **352**, 312, 2016.
14. F. Postberg, R. Srama, J. K. Hillier, S. Sestak, S. F. Green, M. Trieloff, and E. Grün, in *European Planetary Science Congress 2008*, 873 (2008).

15. A. J. Westphal, R. M. Stroud, H. A. Bechtel, F. E. Brenker, et al., *Science*, **345**, 786, 2014.
16. P. D. Anz-Meador, M. A. Ward, A. P. Manis, K. B. Nornoo, B. P. Dolan, C. A. Claunch, and J. A. Rivera, in *First International Orbital Debris Conference*, volume 2109, 6026 (2019).
17. W. J. Baggaley, S. H. Marsh, and S. Close, in H. Krueger and A. Graps, eds., *Dust in Planetary Systems, ESA Special Publication*, volume 643, 27–32 (2007).
18. B. L. Kashcheyev and S. V. Kolomiyets, in B. Warmbein, ed., *Meteoroids 2001 Conference, ESA Special Publication*, volume 495, 643–650 (2001).
19. J. Hajduková, M. and T. Paulech, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, **37**, 18, 2007.
20. E. N. Kramer, A. K. Markina, and L. Y. Skoblikova, *Solar System Research*, **32**, 245, 1998.
21. A. K. Markina and L. Y. Skoblikova, *Astronomical School's Report*, **5**, 169, 2004.
22. J. Hajdukova, M., in *European Planetary Science Congress 2012*, EPSC2012–322 (2012).
23. M. Froncisz, P. Brown, and R. J. Weryk, *P&SS*, **190**, 104980, 2020.
24. R. Musci, R. J. Weryk, P. Brown, M. D. Campbell-Brown, and P. A. Wiegert, *Astrophys. J.*, **745**, 161, 2012.
25. V. L. Afanasiev, V. V. Kalenichenko, and I. D. Karachentsev, *Astrophysical Bulletin*, **62**, 301, 2007.
26. N. I. Perov and V. E. Pakhomycheva, in *Lunar and Planetary Science Conference*, 1014, Lunar and Planetary Science Conference (2020).
27. B. M. Shustov, *INASAN Science Reports*, **4**, 356, 2019.
28. G. Drolshagen, D. Koschny, S. Drolshagen, J. Kretschmer, and B. Poppe, *P&SS*, **143**, 21, 2017.
29. A. Siraj and A. Loeb, *arXiv e-prints*, arXiv:1906.03270, 2019.

Условия появления звезд с вращением, обратным орбитальному вращению их планет

Тутуков А.В., Федорова А.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Обнаружение планетной системы K2-290 A с двумя копланарными планетами, которые обращаются в направлении, обратном вращению центральной звезды, ставит задачу поиска адекватного сценария возникновения таких систем. В данной статье представленные нами ранее сценарии образования планетных систем пересматриваются для оценки возможности формирования в их рамках планет с орбитальным вращением, обратным вращению их центральных звезд. Оценки показывают, что аккреция холодного газа гигантских молекулярных облаков старыми звездами солнечной массы, движущимися в этих облаках с низкой относительной скоростью менее ~ 1 км/с — это наиболее вероятный сценарий возникновения таких планетных систем. С другой стороны, обратное вращение только одной из нескольких планет системы может быть результатом взаимодействия близких массивных планет на неустойчивых орбитах.

Ключевые слова: планеты: образование, орбиты, обратное вращение

Conditions for the appearance of stars with a rotation opposite to the orbital rotation of their planets

Tutukov A.V., Fedorova A.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Detection of planetary system K2-290 A with two coplanar planets, which rotate in the direction opposite to the rotation of the central star, poses the problem of finding an adequate scenario for the emergence of such systems. In this article, the scenarios for the formation of planetary systems are revised to assess the possibility of forming within their framework planets with orbital rotation opposite to the rotation of their central stars. Estimates show that the accretion of cold gas from giant molecular clouds (GMOs) by old solar-mass stars moving in GMOs with a relative speed less than ~ 1 km/s — this is the most probable scenario for the emergence of such planetary systems. On the other hand, the opposite rotation of only one of the several planets of the system can be the result of interaction of nearby massive planets in unstable orbits.

Keywords: planets: formation, orbits, opposite rotation

DOI: 10.51194/INASAN.2021.6.1.005

1. Введение

Исследование формирования и эволюции планетных систем стало за последние десятилетия одним из центральных направлений современной наблюдательной и теоретической астрофизики. Наблюдаемые свойства известных на сегодня четырех тысяч внесолнечных планетных систем [1, 2, 3, 4] представляют богатый материал для интерпретации и теоретического моделирования их физики и эволюции. Изучение их наблюдаемых свойств и анализ возможных сценариев образования планет позволили, в частности, установить, что от трети до половины всех звезд имеют планетные системы [2, 3, 4, 5]. При этом исследование сценариев образования планет продемонстрировало их вероятное многообразие (см., например, [1]). Помимо классического сценария Канта и Лапласа, в котором звезда и ее планетная система одновременно образуются в ходе коллапса вращающегося газо-пылевого облака, возможны и другие сценарии с отдельным образованием планет и их звезд [1]. И если в классическом сценарии совпадение направлений осевого вращения звезды и орбитального вращения ее планет было естественным, то при их отдельном образовании такое «совращение» перестает быть обязательным. Действительно, изучение орбит в известных планетных системах обнаружило, что около ста планет имеют существенное отклонение оси орбитального вращения от оси вращения центральных звезд [6]. При этом 15 планет имеют орбитальное вращение, обратное вращению их звезды, то есть являются ретроградными [6]. В частности, ретроградное вращение обнаружилось у почти четверти близких к своим звездам массивных «горячих юпитеров» [7].

Появление отдельных ретроградных планет вначале было приписано результату их взаимодействия с пролетающими вблизи этих планетных систем звездами [6]. Далее мы оценим вероятность такого события. Кроме того, численное моделирование показало, что взаимодействие планет формирующейся системы может менять направление их орбитального вращения [7]. Однако недавно была обнаружена планетная система K2-290 A с двумя копланарными планетами, которые обращаются в направлении, обратном вращению центральной звезды [8]. Таким образом, в данной системе сама звезда является ретроградной по отношению к своим планетам. Факт существования таких систем, на наш взгляд, требует поиска других сценариев, объясняющих не только возникновение ретроградных планет, но и существование ретроградных звезд.

Далее мы рассмотрим несколько сценариев возникновения ретроградных планет и звезд, опираясь в основном на выполненный нами ранее обзор сценариев образования планетных систем [1] и ряд сравнительно простых оценок. В связи с оценками важно обратить внимание на соотношение угловых моментов звезды и ее планеты. При моменте инерции звезды солнечной массы $\sim 8 \times 10^{53}$ г см² и скорости ее осевого вращения ~ 2 км/с угловой момент планеты будет превосходить угловой момент звезды при выполнении условия:

$$m \gtrsim 4 \times 10^{-4} / A^{1/2}, \quad (1)$$

где масса планеты m и большая полуось планетной орбиты A выражены в солнечных единицах. Из последнего ясно, что направление вращения центральной звезды может быть изменено, например, аккрецией внесистемного газа с массой, сравнимой с планетной, либо поглощением звездой одной из планет с обратным вращением.

2. Сценарии появления ретроградного вращения планет и звезд

2.1. Захват свободных планет одиночными звездами

Образование планетных систем обычно сопровождается потерей астероидов и планет и их уходом в межзвездное пространство [9]. В итоге в галактиках возникает поле «свободных» от звезд планет. Число таких планет в нашей Галактике может быть сравнимо с числом звезд в ней [9]. При достаточно тесном сближении такой планеты со звездой возможен приливной захват планеты с образованием гравитационно связанной системы [10]. Для реализации такой возможности планета должна сблизиться со звездой на расстояние порядка нескольких радиусов звезды при скорости порядка параболической для этого расстояния. Однако при характерных низких пространственных плотностях звезд в окрестности Солнца, близких к ~ 1 pc^{-3} , вероятность такого сближения даже за хаббловское время оказывается равной $\sim 10^{-9}$. Следовательно, не более ~ 100 звезд Галактики имели шанс воспользоваться такой возможностью. Поэтому, хотя этот сценарий и объясняет появление ретроградных планет, следует признать, что в областях с низкой звездной плотностью он осуществляется слишком редко.

2.2. Взаимодействие планет с неустойчивыми орбитами в формирующихся планетных системах

В ходе возникновения и роста планет в протопланетном диске некоторые близкие планеты могут оказаться на неустойчивых орбитах. Если они достаточно массивны, то в ходе гравитационного взаимодействия между собой они могут получить обратное вращение или даже могут быть потеряны системой [9]. Условие такого сильного взаимодействия имеет вид: $m/r \gtrsim M/R_p$, где m и M — массы планет и звезды, r — радиус планет, R_p — расстояние планет от звезды. Ясно, что при массе звезды порядка солнечной и массах и радиусах планет порядка юпитерианских столь сильное взаимодействие возможно уже при $R_p \gtrsim 100R_\odot$. То есть Юпитер смог бы придать Сатурну обратное орбитальное движение или даже удалить его из солнечной системы, окажись тот слишком близко к Юпитеру. Такой сценарий формирования ретроградных планет следует признать возможным, хотя условия его реализации целиком определяются условиями формирования планетных систем в протопланетных дисках и результирующими значениями масс планет и их распределением по большим полуосям орбит.

Некоторое представление о частоте осуществления такого варианта может дать следующий подход. Известно, что распределение планет солнечной системы по большой полуоси орбиты A описывается соотношением: $dN \approx 5 \, dl_g A$ [5]. Исследование внесолнечных планетных систем (см., например, [11]) показывает, что для них также могут выполняться основные закономерности, характерные для солнечной системы. Очевидно, что наблюдаемый интервал $\Delta l_g A \approx 0.2$ продиктован условиями стабильности. При случайном распределении десяти (предположим) планет системы на наблюдаемом интервале больших полуосей $\Delta l_g A \approx 3$ [1, 2] вероятность попадания двух планет юпитерианской массы в интервал пересечения их полостей Роша $\Delta l_g A \approx 0.04$ будет близка к единице. Но для придания одной из них обратного вращения при достаточно сильном взаимодействии массы этих планет должны быть «тонко подобраны» [9, 7]. Последнее обстоятельство хотя и не исключает такой сценарий, но пока делает численную оценку его вероятности неопределенной.

2.3. Сближение планетных систем со звездами поля

В этом варианте, как и в первом из рассмотренных сценариев, для эффективного гравитационного взаимодействия планет со звездой поля необходимо сближение двух звезд на расстояние порядка размеров планетной системы ~ 30 а.е. [3]. Но в окрестностях Солнца характерное минимальное расстояние между звездами, достижимое ими за хаббловское время, составляет $\sim 10^{16}$ см или ~ 670 а.е. Кроме того, для успешного действия этого механизма необходима «тонкая настройка» векторов скоростей всех участников этой задачи

трех тел. Если учесть, что размеры ближайших к своим звездам планетных орбит не превосходят ~ 0.07 а.е., становится ясной крайне низкая вероятность реализации этого сценария появления ретроградных планет.

2.4. Аккреция газа гигантского молекулярного облака звездой типа Солнца

В ходе своего движения в Галактике звезды время от времени попадают в спиральные волны плотности, содержащие в том числе большое количество гигантских молекулярных облаков (ГМО) с массами $10^5 M_\odot - 10^6 M_\odot$ и размерами ~ 100 пк [12, 13]. Радиус зоны захвата звездой с массой M газа облака составляет $R_a \approx GM/v^2$, где G — гравитационная постоянная, v — относительная скорость движения звезды в ГМО. При массе звезды порядка солнечной $R_a \approx 10^{14} v_6^{-2}$ см, где $v_6 = v/10^6$ (здесь v выражено в см/с). Масса вещества, аккрецированного звездой при пересечении ГМО, будет оцениваться соотношением: $\Delta M/M_\odot \approx 10^{-8} n/v_6^4$, где n — плотность вещества ГМО, выраженная в количестве частиц с массой атома водорода в см^{-3} [1]. При $n \sim 10^4$ и $v_6 \lesssim 1$ масса аккрецированного вещества будет близка к $10^{-4} M_\odot$.

Однако необходимо отметить, что прямая аккреция звездой захваченного газа требует выполнения условия: радиус зоны захвата R_a должен превышать размер зоны звездного ветра R_w , который оценивается формулой: $R_w \approx (\dot{M}_w/(4\pi\rho v^2))^{1/2}$, где ρ — плотность вещества ГМО, \dot{M}_w — темп потери массы звездным ветром. Для Солнца $\dot{M}_w \sim 10^{12}$ г/с [14], в результате для звезды солнечного типа $R_w \approx 3 \times 10^{15}/(n^{1/2} v_6)$. Аккреция на звезду становится возможной только при $R_a > R_w$, или $n \gtrsim 10^3 v_6^2 \text{ см}^{-3}$. Это соответствует ограничению для скорости движения звезды:

$$v_6 \lesssim (n/10^3)^{1/2}. \quad (2)$$

Выполнение этого условия возможно для звезд, достаточно медленно движущихся в плотных ГМО. Высокая плотность ГМО обеспечивает также эффективную аккрецию.

Однако если угловой момент аккрецируемого вещества j достаточно велик, это вещество может вместо прямой аккреции на звезду образовывать около звезды компактный газовый тор. Условие образования тора имеет вид: $j \gtrsim v_c R$, где $v_c = (GM/R)^{1/2}$ — кеплеровская скорость на поверхности звезды с массой M и радиусом R . Значение j может превысить указанный предел только при достаточно малой относительной скорости звезды v , которая не должна превышать предел, равный $G^{1/2} M^{3/8} \rho^{1/8} / R^{1/8}$. В итоге получаем ограничение:

$$v_6 \lesssim 0.1 (M/M_\odot)^{3/8} (n/10^4)^{1/8} (R/R_\odot)^{-1/8}. \quad (3)$$

Здесь удельный угловой момент аккрецируемого газа оценивается в предположении, что однородное ГМО вращается твердотельно на предельной скорости. Полученное условие формирования газового тора довольно строгое и хорошо ограничено малыми степенями входящих в него параметров. Дополнительное ограничение вытекает из весьма вероятной неоднородности ГМО, что осложняет накопление газа и углового момента в торе. Отметим, что образование газового тора облегчено около компактных вырожденных карликов, нейтронных звезд и звездных черных дыр ввиду малых значений их радиусов.

Сравнение двух ограничений (2) и (3) на скорость движения звезды в ГМО показывает, что при $n \sim 10^4 \text{ см}^{-3}$ для обеспечения прямой аккреции вещества ГМО на звезду с параметрами Солнца будет достаточно, если скорость ее движения не превышает ~ 30 км/с, в то время как для образования газового тора около звезды требуется более сильное ограничение: скорость звезды не должна превышать ~ 1 км/с.

На основании этих оценок можно предложить два сценария появления ретроградных звезд.

1. Изменение направления вращения старой звезды типа Солнца, уже имеющей планетную систему, в результате аккреции газа ГМО. Если такая звезда движется в достаточно плотном ГМО с относительной скоростью, значение которой лежит между пределами (2) и (3), она может, как отмечено выше, аккрецировать количество вещества порядка $10^{-4} M_\odot$. Этого может быть достаточно для изменения направления вращения звезды с низкой экваториальной скоростью твердотельного вращения порядка 2 км/с, поскольку в этом случае угловой момент аккрецированного вещества будет соизмерим с угловым моментом звезды. В результате после прохождения ГМО экваториальная плоскость звезды в этой планетной системе не будет совпадать с плоскостью орбит планет. Следует дополнительно отметить, что уменьшение с возрастом скорости вращения звезды, характерное для звезд солнечного типа [15], «облегчает» изменение наклона оси звездного вращения вплоть до обратного. Заметим также, что нетвердотельное вращение звезды также может упростить изменение направления вращения ее оболочки на стадии аккреции газа ГМО. Дальнейшая эволюция вращения оболочки такой звезды будет определяться диффузией углового момента в ее недрах.

2. Образование молодой планетной системы около не имеющей планет старой звезды в результате аккреции газа ГМО. Такая возможность образования планетных систем уже была рассмотрена нами ранее [1]. Если относительная скорость движения звезды в ГМО не превосходит предела (3), образование газового тора из аккрецируемого вещества около звезды открывает возможность формирования

планетной системы. При этом орбитальные плоскости формирующихся планет будут задаваться направлением вращения ГМО, и следовательно, будут иметь произвольное положение относительно экваториальной плоскости центральной звезды.

2.5. Другие возможности получения ретроградной звезды

Рассмотрим еще две гипотетические возможности появления ретроградных звезд. Первая из них возникает в случае, когда вращение коллапсирующего протозвездного облака, из которого формируется звезда и ее планеты, становится неоднородным. Это возможно, например, в случае, когда вращение внешних областей этого облака возмущают близкие прохождения соседних звезд в молодом звездном скоплении. Этот эффект может исказить соосность осей вращения протопланетного диска и звезды. Однако получение ретроградного орбитального движения всех формирующихся планет в этом случае представляется маловероятным.

Вторая возможность возникает, если в формирующейся планетной системе есть массивная ретроградная планета, движущаяся по очень неустойчивой орбите, которая в конечном счете приводит ее к столкновению со звездой. Поглощение планеты с обратным вращением может привести к изменению направления осевого вращения оболочки звезды, которое в итоге может даже оказаться противоположным по отношению к обращению оставшихся планет. Минимальное значение массы поглощаемой планеты, необходимое для такого изменения, можно оценить так. Предположим, что планета попадает на край звезды с соответствующей параболической скоростью, а масса и радиус звезды равны солнечным. Тогда из (1) получаем, что угловой момент планеты будет превосходить угловой момент звезды при массе планеты, большей $\sim 0.0003M_{\odot}$ (0.3 массы Юпитера). Таким образом, поглощение даже не слишком массивной ретроградной планеты может повлиять на вращение звезды. Однако вероятность описываемого события, скорее всего, низка.

3. Заключение

Ретроградное орбитальное вращение некоторой малой части найденных экзопланет сейчас надежно установлено. Выполненный выше сценарный анализ позволяет сделать следующие выводы. Возникновение отдельных ретроградных планет в хорошо населенной системе может быть результатом взаимодействия близких массивных планет на неустойчивых орбитах. Этот же сценарий может, вероятно, объяснить возникновение части ультрагорячих планет, очень близких к звезде и почти заполняющих свои полости Роша при орбитальных периодах менее одного дня. Однако для объяснения ретроградного вращения центральной звезды в системе K2-290 A с двумя планетами (вполне вероятно, что существуют и другие системы подобного рода) наиболее перспективным представляется сценарий, в котором старая звезда солнечного типа, еще не имеющая планетной системы, медленно движется через гигантское молекулярное облако в спиральной волне плотности, аккрецируя вещество этого облака. Из аккрецированного вещества может сформироваться планетная система. Согласно приведенным выше оценкам, это возможно при относительной скорости звезды ~ 1 км/с. В такой системе плоскости орбитального движения планет будут определяться направлением вращения ГМО, и следовательно, будут иметь произвольное положение относительно экваториальной плоскости центральной звезды. Обоснование возможности этого сценария важно для подтверждения актуальности многосценарного подхода к проблеме возникновения и эволюции планетных систем.

Список литературы

1. A. V. Tutukov and A. V. Fedorova, *Astronomy Reports*, **56**, 305, 2012.
2. M. Marov, *The Formation and Evolution of the Solar System*, 2 (2018).
3. D. Raghavan, H. A. McAlister, T. J. Henry, D. W. Latham, et al., *Astrophys. J. Supp.*, **190**, 1, 2010.
4. L. A. Hirsch, L. Rosenthal, B. J. Fulton, A. W. Howard, et al., *Astron. J.*, **161**, 134, 2021.
5. A. V. Tutukov, *Soviet Astronomy*, **31**, 663, 1987.
6. A. Breslau and S. Pfalzner, *Astron. and Astrophys.*, **621**, A101, 2019.
7. S. Naoz, W. M. Farr, Y. Lithwick, F. A. Rasio, and J. Teyssandier, *Nature*, **473**, 187, 2011.
8. M. Hjorth, S. Albrecht, T. Hirano, J. N. Winn, R. I. Dawson, J. J. Zanzizzi, E. Knudstrup, and B. Sato, *arXiv e-prints*, arXiv:2102.07677, 2021.
9. A. V. Tutukov, G. N. Dremova, and V. V. Dremov, *Astronomy Reports*, **64**, 936, 2020.
10. N. Madappatt, O. De Marco, J. Nordhaus, and M. Wardle, in S. Schuh, H. Drechsel, and U. Heber, eds., *Planetary Systems Beyond the Main Sequence, American Institute of Physics Conference Series*, volume 1331, 319–323 (2011).
11. J. H. Steffen and J. A. Hwang, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **448**, 1956, 2015.
12. P. M. Solomon, D. B. Sanders, and N. Z. Scoville, in W. B. Burton, ed., *The Large-Scale Characteristics of the Galaxy*, volume 84, 35 (1979).
13. A. Mok, R. Chandar, and S. M. Fall, *Astrophys. J.*, **893**, 135, 2020.
14. W. Mishra, N. Srivastava, Y. Wang, Z. Mirtoshev, J. Zhang, and R. Liu, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **486**, 4671, 2019.
15. A. Skumanich, *Astrophys. J.*, **171**, 565, 1972.

Низкоскоростное сближение астероида 2006 RH120 с Землей

Емельяненко Н.Ю., Нароенков С.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Исследовано низкоскоростное сближение астероида 2006 RH120 с Землей в 2006 г. Это первый наблюдаемый астероид с длительным временным гравитационным захватом в сферу Хилла Земли. Выполнено моделирование движения объектов из области низкоскоростных сближений малых тел с Землей. Обнаружены объекты с временными спутниковыми захватами в смысле Эверхарта. Найден объект, подобный астероиду 2006 RH120.

Ключевые слова: астероид, тесное сближение, Земля, гравитационный захват

The low-velocity encounter of asteroid 2006 RH120 with the Earth

Emel'yanenko N.Yu., Naroenkov S.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The low-velocity encounter of the asteroid 2006 RH120 with the Earth in 2006 has been investigated. This is the first observed asteroid with a long-term gravitational capture into the Hill sphere of the Earth. The modeling of the motion of objects from the area of low-velocity approaches of small bodies with the Earth is carried out. Objects with temporary satellite captures in the sense of Everhart have been detected. An object similar to the asteroid 2006 RH120 has been found.

Keywords: asteroid, close encounter, Earth, gravitational capture

DOI: 10.51194/INASAN.2021.6.1.006

1. Введение

В работе [1] предложены области ω_P — области орбит малых тел на плоскости (a, e) , допускающие низкоскоростные сближения с планетами, и определены предельные значения постоянной Тиссерана (T_{lim}^P), при которых возможны низкоскоростные сближения относительно планеты (индекс P означает некоторую планету). В работе [2] для наблюдаемых комет семейства Юпитера были найдены сближения с временным спутниковым захватом в смысле Эверхарта (ВСЗ) и геометрическими кратными минимумами функции планетоцентрического расстояния (ГКМ). В 20 сближениях из области ω_J происходит временный гравитационный захват в сферу Хилла (ВГЗ), в 14 сближениях появляются физические кратные минимумы (ФКМ). Информация о ВСЗ, ВГЗ, ГКМ и ФКМ имеется, например, в работах [1, 3]. Впоследствии подобные особенности были обнаружены в сближениях малых тел с Сатурном [4].

2. Основные задачи исследования

Изучить сближение астероида 2006 RH120 с Землей в 2006 г. как наиболее достоверное, сопровождавшееся длительным временным гравитационным захватом. Осуществить поиск модельных малых тел с временными спутниковыми и гравитационными захватами, подобными ВГЗ астероида 2006 RH120, для чего провести моделирование движение объектов с орбитами из области ω_E .

Метод

Мы численно интегрировали дифференциальные уравнения движения астероида 2006 RH120, восьми планет и Плутона. Использовались элементы орбиты из электронного источника «Каталог астероидов Лаборатории реактивного движения НАСА»¹.

Сближение астероида 2006 RH120 с Землей в 2006 г.

Применим результаты, полученные в перечисленных выше работах, для интерпретации движения астероида 2006 RH120 в окрестности Земли в 2006 г. Астероид 2006 RH120 был открыт на расстоянии $r \approx 0.005$ а.е. от Земли. В момент открытия астероид находился внутри орбиты Земли глубоко в сфере Хилла (между Землей и орбитой Луны). Расчет эволюции элементов орбиты показал, что в момент открытия астероид находился на эллиптической геоцентрической орбите. Так как размеры астероида не превышали 10 метров, высказывались предположения об искусственном происхождении объекта. Но фотометрия показала низкое альbedo, что говорило о его естественном происхождении [5]). В статье [6] приведены данные о шести подобных объектах, но высказывается предположение о том, что только 2006 RH120 — естественный астероид.

¹<http://ssd.jpl.nasa.gov>

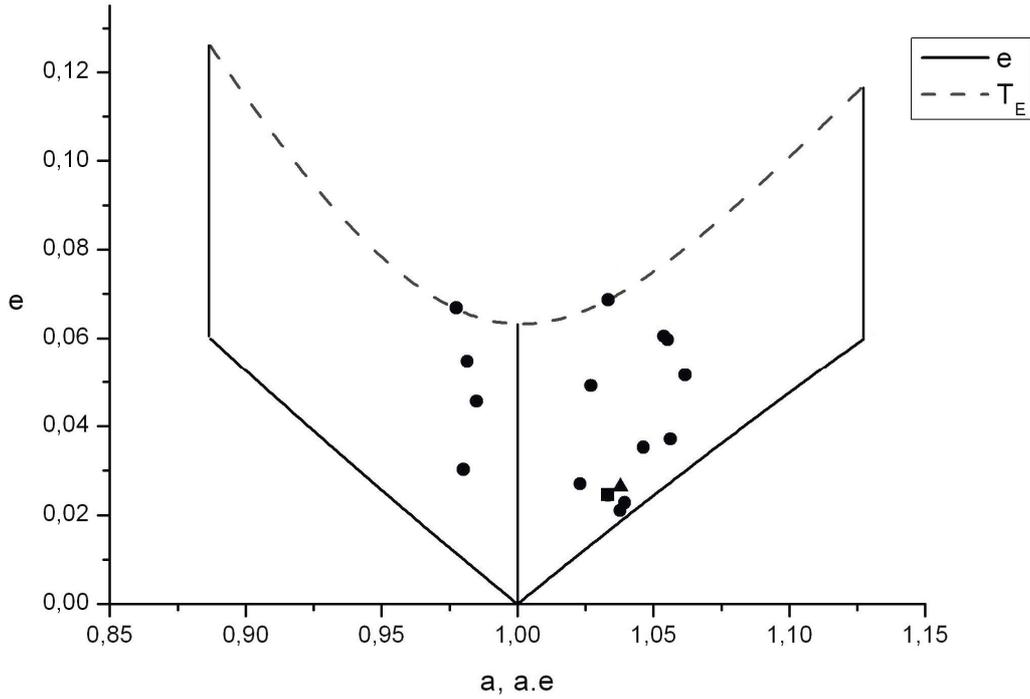


Рис. 1: Область ω_E с наблюдаемыми астероидами. Знаком \blacksquare выделен астероид 2006 RH120 на эпоху 2456200.5, близкую к моменту его выхода из области сближения; знаком \blacktriangle выделен модельный астероид «Квазиспутник».

Наши исследования показали, что орбита астероида принадлежит области ω_E — области орбит с особенностями в сближениях с Землей (см. рис. 1). Положение орбиты астероида на плоскости (a, e) допускало длительный ВГЗ.

Проведем качественный анализ сближения астероида 2006 RH120 с Землей. Астероид 2006 RH120 — это астероид с высоким значением постоянной Тиссерана относительно Земли ($T_E \approx 3$). Постоянная Тиссерана вычислялась по формуле из работы [7].

$$T_E = \frac{a_E}{a} + 2\sqrt{\frac{a_E}{a}(1-e^2)} \cos i, \quad (1)$$

но вместо величины a_E мы использовали радиус гелиоцентрической орбиты Земли r_E на каждом шаге интегрирования. Так как мы рассматриваем возмущенное движение астероида в окрестности Земли, находящейся на эллиптической гелиоцентрической орбите, величина T_E будет изменяться. Поэтому далее в этой работе величину T_E мы называем параметром Тиссерана (относительно Земли).

В работе [8] вводятся понятия области сближения малого тела с планетой ($R_p \leq 6R_H^P$, где R_H^P — радиус сферы Хилла планеты) и длительности сближения (ΔT — время пребывания тела в области сближения). На промежутке времени ΔT (длительность сближения) орбита астероида 2006 RH120 принадлежит области ω_E . Верхняя граница области ω_E задается условием: $T_{\text{lim}} = 2.996$, нижняя граница области — это линия орбит, на которых есть одна точка низкоскоростного касания орбит малого тела и Земли [9]. Для внутренних точек области ω_E и точек ее верхней границы на орбите малого тела имеются две точки низкоскоростного касания орбиты Земли. Вертикальные границы области находятся из следующего условия: точки низкоскоростного касания должны попадать в область сближения $R_E \leq 0.06$ а.е.[1]. В дальнейшем изложении мы будем анализировать положения орбит астероида 2006 RH120 и модельного астероида «Квазиспутник» на плоскости (a, e) . Для сокращения описания анализа дадим следующее определение. Последовательность точек, соответствующих положению орбиты небесного тела на плоскости (a, e) в области сближения или какого-либо другого промежутка времени, назовем треком орбиты тела. Сближение астероида 2006 RH120 с Землей в 2006 г. длилось 1.8 г. Сближение сопровождалось временным спутниковым захватом в смысле Эверхарта ($\Delta\tau = 472$ сут.). ВСЗ начинается и заканчивается в окрестностях точек низкоскоростного касания орбит малого тела и Земли на расстояниях $r_\tau^b = 0.0127$ а.е.; $r_\tau^e = 0.0205$ а.е. Так же как и во всех предыдущих исследованных Емельяненко сближениях малого тела с планетой, ВСЗ вызвано геометрическими причинами (векторы гелиоцентрических скоростей Земли и астероида приблизительно равны на низкоскоростных касательных участках орбит астероида и планеты). В окрестностях первой точки касания M_1 элементы ор-

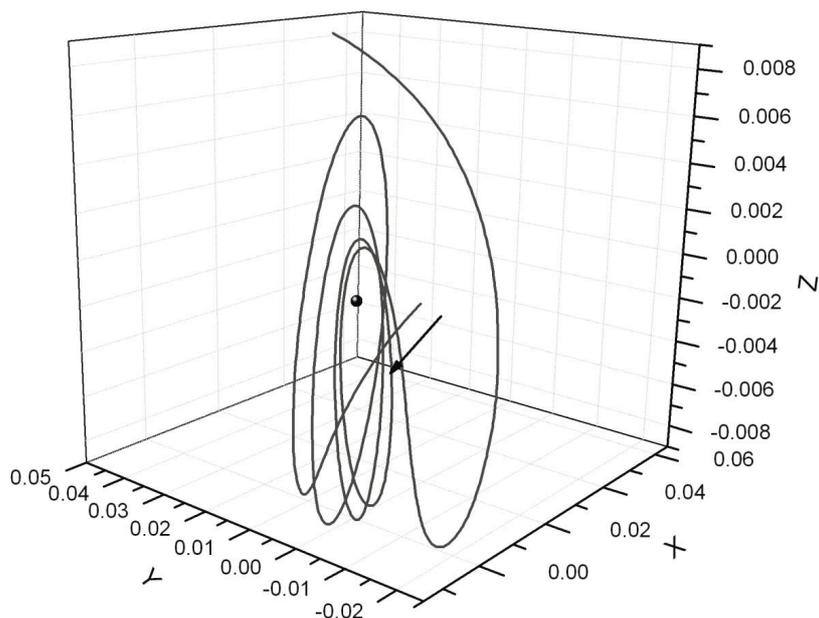


Рис. 2: Геоцентрическая траектория астероида 2006 RH120.

бит астероида и Земли, характеризующие размеры и форму, близки, у астероида $a = 0.0974$ а.е.; $e = 0.0515$. За промежуток времени $\Delta\tau$ астероид проходит три точки низкоскоростного касания орбит, все — в сфере Хилла ($R_H^E = 0.0101$ а.е.). Сравнивая величины r_τ^b , r_τ^e и R_H^E , убеждаемся, что ВСЗ астероида действительно вызвано геометрическими причинами (начинается и заканчивается за пределами сферы Хилла). Но он входит в сферу Хилла (тесное сближение) и совершает четыре обращения вокруг Земли (см. рис. 2).

Общее время пребывания в сфере Хилла $\Delta t_H = 327$ сут. В сфере Хилла имеются два очень небольших промежутка времени (в сумме менее 10 суток), когда оскулирующая геоцентрическая орбита астероида — гипербола. На промежутке времени $\Delta t_1 = 44$ сут. астероид находится вне сферы Хилла (максимальное удаление от Земли $r = 0.01166$ а.е.), затем снова входит в сферу и испытывает глобальный четвертый минимум. Суммарное время обращения астероида вокруг Земли $\Delta t_2 = \Delta t_H + \Delta t_1 = 371$ сут., что почти совпадает с земным годом. В течение промежутка времени Δt_2 гелиоцентрическая орбита астероида нестабильна (см. рис. 3). Трек элементов орбиты астероида 2006 RH120 на плоскости (a, e) (рис. 3) — негладкая кривая. Это явление фиксируется для малых тел в области низкоскоростного сближения с планетой. Анализ сближений показал, что разрыв производных происходит в окрестности точки низкоскоростного касания орбит (точки, в которой модули гелиоцентрических скоростей планеты V_P и малого тела V равны, а векторы скоростей почти параллельны). Если, например, до этой точки $V_P > V$, то после ее прохождения $V_P < V$ или наоборот. Явление не наблюдается, если на орбите малого тела нет точек низкоскоростного касания (для орбит, расположенных между нижней линией области ω_E и осью абсцисс), или эти точки не принадлежат области сближения (орбиты находятся выше верхней линии области ω_E и, одновременно, вне области ω_E).

До открытия малых тел, движущихся по почти круговым гелиоцентрическим орбитам, выделяли объекты с афелием в окрестности орбиты планеты (A орбиты) и объекты с перигелием в окрестности орбиты планеты (P орбиты). Если в сближении происходил в ту или иную сторону $A \leftrightarrow P$ переход, то говорили, что произошла реверсия линии апсид [10]. На плоскости (a, e) $A(P)$ орбиты расположены левее (правее) линии $a = a_p$, где a_p — это большая полуось орбиты планеты. Трек орбиты астероида 2006 RH120 на плоскости (a, e) семь раз пересекает линию $a = 1$. Формально можно говорить о том, что имели место семь реверсий линии апсид. В начальный момент сближения (T_1) орбита астероида находится внутри орбиты Земли, в конечный момент сближения (T_2) — за ее пределами. В момент открытия астероид имел орбиту A , в конце сближения — орбиту P (за время сближения произошел $A \rightarrow P$ переход) (см. рис. 3). По мере продвижения астероида к концу сближения глубина минимумов увеличивается: $\rho_1 = 0.00561$ а.е.; $\rho_2 = 0.00358$ а.е.; $\rho_3 = 0.00238$ а.е.; $\rho_4 = 0.00186$ а.е. Временные промежутки между минимумами близки: $\Delta t_{1-2} = 75$ сут., $\Delta t_{2-3} = 81$ сут., $\Delta t_{3-4} = 80$ сут. Последнее обстоятельство является дополнительным доказательством того, что астероид 2006 RH120 был захвачен Землей (испытал временный гравитационный захват в сферу Хилла) и совершил четыре обращения вокруг планеты. Все минимумы — физические, так как в той ча-

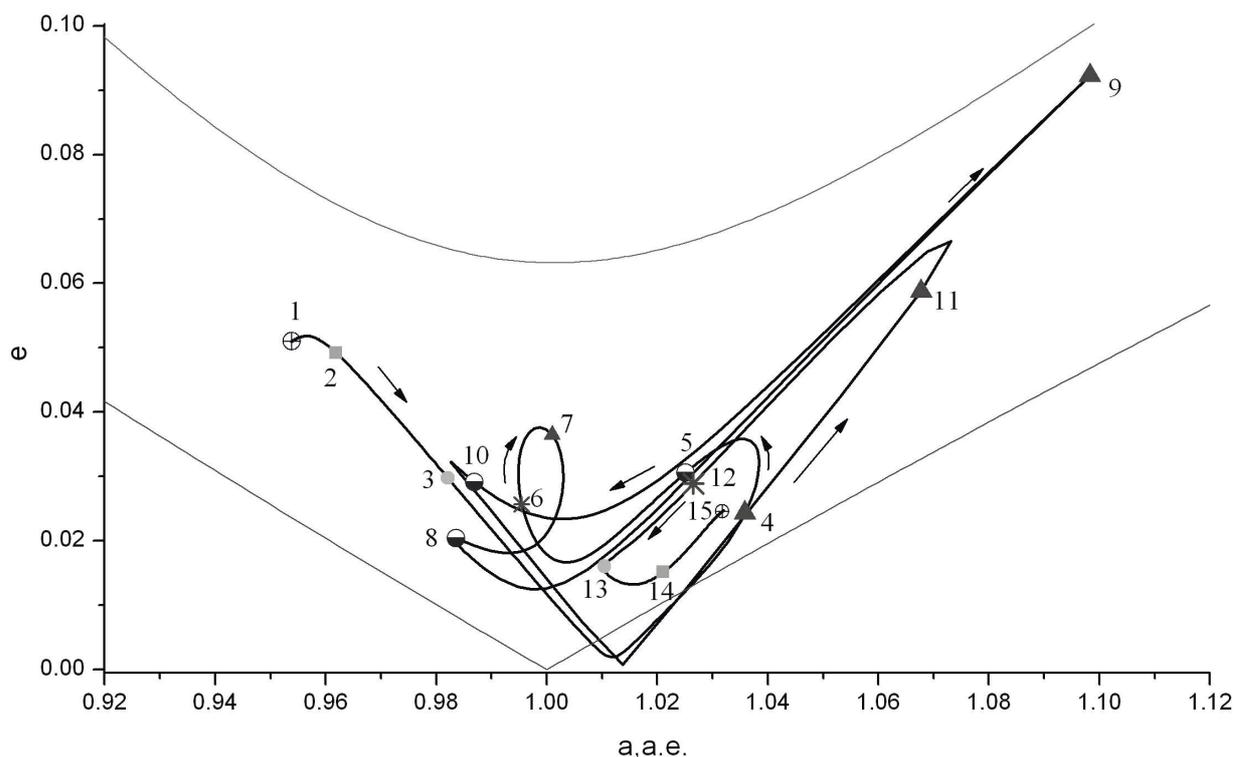


Рис. 3: Трек орбиты астероида 2006 RH120 на плоскости (a, e) . Цифрами обозначены: 1 — начало сближения, 2 — начало ВСЗ, 3 — вход в сферу Хилла, 4 — ρ_1 (первый минимум), 5 — f_1 (первый максимум), 6 — первое наблюдение, 7 — ρ_2 (второй минимум), 8 — f_2 (второй максимум), 9 — ρ_3 (третий минимум), 10 — f_3 (третий максимум), 11 — ρ_4 (четвертый минимум), 12 — последнее наблюдение, 13 — выход из сферы Хилла, 14 — конец ВСЗ, 15 — конец сближения.

сти области ω_E , где расположен трек орбиты астероида, геометрические кратные минимумы невозможны. На протяжении всего сближения параметр Тиссерана относительно Земли изменяется мало. На большей части сближения в окрестностях точек либрации L_1 и L_2 , имеются широкие перемычки. Астероид входит в сферу Хилла со стороны точки L_1 . Но в области сближения имеется несколько промежутков времени, в течение которых перемычка в окрестности точки L_2 узкая. Последнее обстоятельство затрудняет выход астероида из сферы Хилла через точку L_2 (апогей орбиты астероида близок к границе сферы Хилла). В области сближения поверхность Хилла вокруг Земли для астероида не замкнута. Движение астероида 2006 RH120 в окрестности Земли неустойчиво по Хиллу. Самый тесный четвертый минимум увеличивает апогей астероида. Из-за изменения элементов геоцентрической орбиты в окрестности апогея перемычка в окрестности точки L_2 расширяется — астероид выходит из сферы Хилла. Форма гелиоцентрической орбиты астероида близка к круговой на протяжении всего сближения ($e_{\max} = 0.051$, $e_{\min} = 9.8 \cdot 10^{-5}$).

В работе были получены серии возможных орбит, находящихся в доверительном интервале элементов a, e орбиты астероида 2006 RH120, на основе использования матрицы Холецкого [11]. Было сгенерировано полторы тысячи орбит. Большие полуоси и эксцентриситеты виртуальных объектов находились в пределах: $\Delta a = 0.8 \cdot 10^{-8}$ а.е., $\Delta e = 0.8 \cdot 10^{-9}$ от номинальных значений. Эти орбиты применялись для исследования эволюции областей возможного движения астероида. Сближение 2006 г. с Землей сохранилось для всей выборки. Оно сопровождалось временным спутниковым захватом в сферу Хилла. Захват продолжался от 500 до 2500 дней.

3. Поиск модельных объектов с низкоскоростными сближениями с Землей

Генерировались случайным образом объекты из области ω_E . Исследование популяции модельных околоземных объектов было проведено на основе математической модели АСЗ Гранвика-Ботке-Морбидели [12]. После анализа эволюции более 5 тысяч модельных объектов был найден очень интересный объект, который мы назвали «Квазиспутник». Гелиоцентрическая орбита «Квазиспутника» в начальный момент сближения близка к орбите астероида 2006 RH120 в момент времени, почти совпадающий с концом сближения (см. рис. 1). Анализ результатов численного интегрирования уравнений движения «Квазиспутника» на 800 лет показал, что на исследованном промежутке времени объект имел 11 низкоскоростных сближений с Землей.

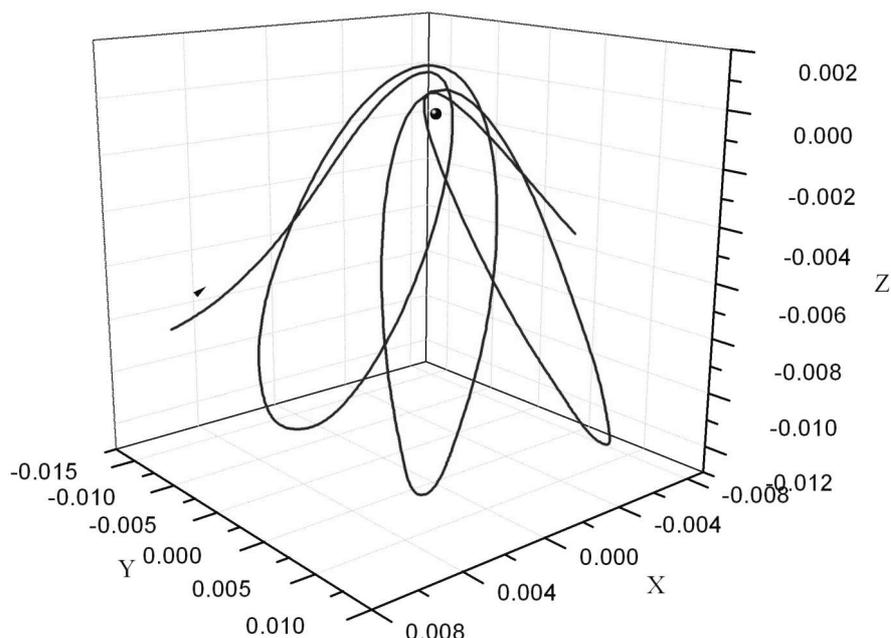


Рис. 4: Геоцентрическая траектория астероида «Квазиспутник».

лей. В трех сближениях модельный астероид входил в сферу Хилла. Самое продолжительное пребывание в сфере Хилла составило 174 сут. (что существенно меньше, чем у астероида 2006 RH120). Суммарное время вращения объекта вокруг Земли составило 376 сут. (у астероида 2006 RH120 $\Delta t_2 = \Delta t_H + \Delta t_1 = 371$ суток). За 376 суток «Квазиспутник» четыре раза обернулся вокруг Земли, как и астероид 2006 RH120 (см. рис. 4). Максимальное удаление от Земли в этот промежуток времени не превышало 0.015 а.е.

4. Заключение

Исследовано достоверное сближение астероида 2006 RH120 с Землей. Астероид испытывает длительный ВСЗ в сфере Хилла — временный гравитационный захват с четырехкратным обращением вокруг Земли. Астероид находился в сфере Хилла 327 сут. Промежутки между минимумами были одного порядка и их среднее значение можно считать периодом обращения астероида вокруг Земли. Как гелиоцентрическая, так и геоцентрическая орбиты астероида претерпевали изменения. Но функция геоцентрического расстояния имела четыре физических минимума. В целом, движение астероида было неустойчиво по Хиллу, но на отдельных интервалах времени перемишки в окрестностях точек либрации были узкими. Факт наличия перемишек и увеличения ширины перемишки после четвертого минимума послужил причиной выхода астероида из сближения. Проведено широкомасштабное моделирование объектов с орбитами из области ω_E . Найдены объекты с короткими временными спутниковыми захватами в смысле Эверхарта вне сферы Хилла и внутри нее. Временный гравитационный захват объекта Землей, подобный захвату астероида 2006 RH120, обнаружен у модельного объекта — «Квазиспутник». Его орбита (P) на входе в область сближения близка к орбите астероида 2006 RH120 на выходе из области сближения. Напомним, что астероид 2006 RH120 до сближения имел орбиту (A). Выполненная работа показала, что Земля, подобно Юпитеру, может перебрасывать малые тела с орбит, расположенных внутри ее орбиты, за пределы земной орбиты. Также возможен обратный процесс. Это первый случай для наблюдаемого астероида в низкоскоростном сближении. Треки гелиоцентрических орбит 2006 RH120 и «Квазиспутника» на плоскости (a, e) были сложными, но они практически не выходили из области ω_E .

Список литературы

1. N. Y. Emel'yanenko, *Solar System Research*, **49**, 398, 2015.
2. N. Y. Emel'yanenko, *Evolution of the elements of the orbits of short-period comets* (2002).
3. N. Y. Emel'yanenko, *Solar System Research*, **46**, 181, 2012.
4. N. Y. Emel'yanenko, in M. E. Sachkov, A. P. Kartashova, and V. V. Emelyanenko, eds., *V Bredikhin Readings: Proceedings of the International Conference, May 12-16 2014*, 82–86 (2014).
5. T. Kwiatkowski, A. Kryszczyńska, M. Polińska, D. A. H. Buckley, et al., *Astron. and Astrophys.*, **495**, 967, 2009.
6. M. Granvik, J. Vaubaillon, and R. Jedicke, *Icarus*, **218**, 262, 2012.
7. A. Carusi, G. B. Valsecchi, and M. Kresakova, *Astron. and Astrophys.*, **116**, 201, 1982.
8. N. Y. Emel'yanenko, *Solar System Research*, **49**, 404, 2015.

9. N. Y. Emel'yanenko, *Solar System Research*, **52**, 146, 2018.
10. N. Y. Emel'yanenko, in B. M. Shustov and D. S. Wiebe, eds., *Stars and Satellites, Proceedings of the Memorial Conference Devoted to A.G. Masevich 100th Anniversary*, 129–134 (2018).
11. V. A. Avdushev, *Numerical simulation of orbits* (2010).
12. M. Granvik, A. Morbidelli, R. Jedicke, B. Bolin, et al., *Icarus*, **312**, 181, 2018.

Содержание

<i>Сичевский С.Г.</i> Оценка характеристик звезд по SDSS и 2MASS фотометрии	1
<i>Кузин С.П.</i> Низкоорбитальная спутниковая группировка системы контроля геодезических параметров Земли и направления ее развития	7
<i>Кузин С.П.</i> Ключевая роль ГНСС для контроля геодезических параметров Земли	10
<i>Шустов Б.М.</i> Сколько межзвездных гостей в Солнечной системе?	16
<i>Тутуков А.В., Федорова А.В.</i> Условия появления звезд с вращением, обратным орбитальному вращению их планет	22
<i>Емельяненко Н.Ю., Нароенков С.А.</i> Низкоскоростное сближение астероида 2006 RH120 с Землей	26

Contents

<i>Sichevsky S.G.</i> Separation of stellar properties using SDSS, 2MASS magnitudes	1
<i>Kuzin S.P.</i> Low-orbit satellite grouping of the system for monitoring geodesic parameters of the Earth and the direction of its development	7
<i>Kuzin S.P.</i> The key role of GNSS for monitoring geodetic parameters of the Earth	10
<i>Shustov B.M.</i> How many interstellar visitors are there in the Solar System?	16
<i>Tutukov A.V., Fedorova A.V.</i> Conditions for the appearance of stars with a rotation opposite to the orbital rotation of their planets	22
<i>Emel'yanenko N.Yu., Naroenkov S.A.</i> The low-velocity encounter of asteroid 2006 RH120 with the Earth	26