

УДК 523.44-32

О ПАРАМЕТРАХ СБЛИЖЕНИЙ АСТЕРОИДОВ С ЗЕМЛЕЙ

© 2024 Р. В. Золотарев^{1*}, Б. М. Шустов^{1**}¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 23 апреля 2024 года; после доработки 19 августа 2024 года; принята к публикации 19 августа 2024 года

В работе представлены результаты статистического моделирования входа астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), в околоземное космическое пространство (ОКП) — сферу радиусом 0.01 а.е. вокруг Земли. Построены распределения астероидов по направлению и скорости входа в ОКП. Население АСЗ моделировалось при помощи программы NEOMOD с последующим интегрированием динамической эволюции на 110 лет с использованием пакета REBOUND. Показано, что: 1) количество астероидов размером более 10 м, входящих в ОКП, равно примерно 1000 в год; 2) до половины астероидов могут входить в ОКП со стороны дневной полусферы; 3) плотность потока астероидов повышена в солнечном и антисолнечном направлениях. Типичные скорости сближений с Землей при входе в ОКП составляют примерно 7.5 км с^{-1} (интервал значений скоростей от 0 до 30 км с^{-1}). Также рассчитано распределение входов по расстоянию и скорости относительно наблюдателя, находящегося в точке Лагранжа L_1 системы Солнце–Земля. Эти распределения могут быть полезны при проектировании системы обнаружения дневных астероидов («СОДА»).

Ключевые слова: астероиды: астероиды сближающиеся с Землей

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведется активная разработка систем обнаружения и контроля опасных небесных тел естественного происхождения (см., например, Shugarov and Shustov (2022); Koblov et al. (2022); «National preparedness strategy and action plan for near-earth object hazards and planetary defense»¹). Для построения более эффективных систем необходимо знать свойства распределения таких тел в околоземном пространстве. В рамках данной работы под околоземным космическим пространством (ОКП) понимается пространство внутри сферы радиусом 0.01 а.е. вокруг Земли, что примерно соответствует радиусу сферы Хилла.

Напомним несколько определений. Объект, сближающийся с Землей (ОСЗ) — астероид (АСЗ) или комета (КСЗ) с перигелийным расстоянием менее 1.3 а.е. Среди известных ОСЗ астероиды составляют 99.65%², поэтому в дальнейшем рассматривается только население АСЗ. Среди

ОСЗ выделяют класс потенциально опасных объектов (ПОО) — это объекты крупнее 140 м, орбита которых допускает сближение с Землей на расстояние менее 0.05 а.е. Однако современное понимание опасного тела включает в себя объекты размером вплоть до 10 м (Shustov et al., 2015). Объекты декаметрового класса хоть и не несут угрозы глобальной катастрофы, но их падение может приводить к значительным локальным последствиям. Примером может служить падение метеорита вблизи Челябинска в феврале 2013 года.

Челябинское событие примечательно еще тем, что астероид вошел со стороны неба, освещенной Солнцем, и никак не мог быть отслежен до вхождения в атмосферу. Это показало необходимость создания систем, способных отслеживать объекты, приходящие со стороны дневного неба. Рассмотрим понятие «дневное небо» подробнее. Строгого определения на данный момент не существует. Согласно очень простому (бытовому) представлению, дневное небо — это половина всей небесной сферы, то есть телесный угол полным раствором 180° (плоским углом при вершине, совпадающей с Солнцем). Если говорить о дневном небе как области на небесной сфере, недоступной для наблюдений астрономических объектов в данный момент времени в оптическом диапазоне из любого места на земном шаре, то формально к дневному небу можно отнести околосолнечную область на небесной сфере радиусом 18° , но это применимо

*E-mail: rv_zolotarev@mail.ru

**E-mail: bshustov@mail.ru

¹<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/04/2023-NSTC-National-Preparedness-Strategy-and-Action-Plan-for-Near-Earth-Object-Hazards-and-Planetary-Defense.pdf> (дата обращения 21.03.2024)²<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html> (дата обращения 21.03.2024).

только для астрономически идеальной Земли, густо и равномерно покрытой пунктами наблюдений и лишенной атмосферы. На практике область, недоступная в данный момент для наблюдений наземными и даже околоземными (на низких орбитах) оптическими средствами, занимает гораздо большую площадь (см. рис. 4 и 5 в работе Shustov et al., 2015).

Для обнаружения и оповещения о сближениях с потенциально опасными дневными астероидами размером от 10 м перспективным представляется использование космических телескопов небольшой апертуры (20–30 см), расположенных относительно далеко от Земли, в окрестности точки Лагранжа L_1 в системе Солнце–Земля. Такой проект — «Система обнаружения дневных астероидов» («СОДА») — был предложен в статье Shustov et al. (2015) и развит в работе Shugarov and Shustov (2022).

Понятно, что для создания эффективной системы обнаружения таких АСЗ нужно представлять характеристики входов АСЗ в околоземное пространство. Целью данной работы является изучение распределения АСЗ размером от 10 м, входящих в ОКП, по направлениям входа и скорости сближения с Землей. Подобное исследование проводилось ранее (Vereš et al., 2009; Shustov et al., 2013, 2017) на основе доступных на тот момент данных. За прошедшее время появились новые данные и возникли новые запросы, в частности относящиеся к проекту «Млечный путь» по созданию общероссийской системы информационного обеспечения безопасности космической деятельности (Koblov et al., 2022).

Для решения поставленной задачи нужно проследить динамическую эволюцию населения АСЗ на достаточно большом интервале времени (например, в несколько десятков характерных периодов АСЗ), отмечая все входы астероидов в ОКП. При использовании такой методики задачу можно разделить на две части:

- 1) построение модели населения АСЗ с размерами астероидов 10 м и более;
- 2) интегрирование движения астероидов с фиксацией сближений с Землей.

Подобный подход применялся в работах Shustov et al. (2017) и в Zolotarev (2023). Данную статью можно рассматривать как продолжение работы Zolotarev (2023) с улучшением методики моделирования.

В разделе 2 описана используемая методика, результаты моделирования представлены в разделе 3, в разделе 4 обсуждаются полученные результаты.

2. МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для решения первой подзадачи — построения модели населения АСЗ — идеальным подходом было бы использовать данные об орбитах реальных объектов, но эта выборка должна быть полной. К сожалению, достаточная полнота (95%) достигнута лишь для АСЗ размером свыше 1 км¹. Поэтому при решении задачи необходимо использовать модель населения АСЗ, включающую размеры вплоть до 10 м. Для построения такой модели использовался открытый программный пакет NEOMOD (Nesvorný et al., 2023; 2024). В нем учитываются предполагаемые источники АСЗ и генерируются распределения АСЗ по абсолютной звездной величине астероидов H и элементам орбит (большой полуоси a , эксцентриситету e и наклонению i). Модель АСЗ в NEOMOD является развитием модели Granvik et al. (2018), используемой в широко распространенном программном комплексе NEOPOP (Hahn et al., 2014).

Согласно модели NEOMOD, полное количество астероидов размером более 10 м ($15 < H < 28$) составляет около 11.5 млн. Однако из-за ограничения вычислительных ресурсов расчет движения для такой большой выборки был затруднен, поэтому он проводился для набора из 1 млн астероидов, сгенерированного при помощи пакета NEOMOD, который сохраняет все свойства распределений полной модели. Затем, при обработке результатов вычислений, количество вхождений АСЗ в ОКП умножалось на соответствующий множитель 11.5. При этом в расчетах, не требующих интегрирования движения, использовался полный модельный набор астероидов.

Программа NEOMOD на выходе предоставляет набор параметров астероидов H, a, e, i . Для генерации начальных условий на следующем этапе этот набор был дополнен еще тремя параметрами, позволяющими задать начальное положение астероида: долготой восходящего узла Ω , аргументом перигелия ω и средней аномалией M . Внутри нашей выборки данные величины были распределены равномерно в диапазоне $[0, 2\pi)$, что соответствует распределению среди наблюдаемых астероидов.

На втором этапе проводилось интегрирование движения заданной популяции астероидов, в котором отслеживались сближения с Землей. Для решения этой задачи мы использовали открытый код REBOUND (Rein and Liu, 2012). При этом интегрирование производилось в два этапа:

1. Расчет движения всех астероидов на интервале времени 110 лет с учетом возмущений от планет при помощи гибридной схемы MERCURIUS (Rein et al., 2019) с шагом один день. В ходе интегрирования производился отбор астероидов, сблизившихся с Землей на 0.05 а.е. Координаты

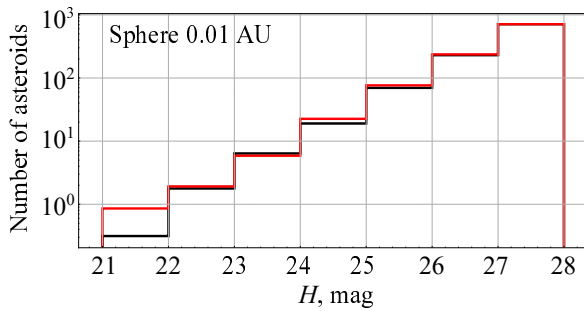


Рис. 1. Черная линия — распределение потока (число входов в год) модельных астероидов в ОКП по абсолютной звездной величине H . Красная линия — распределение в исходном наборе астероидов, нормированное по высоте таким образом, чтобы совпадали высоты крайних правых столбцов в обоих распределениях.

и скорость таких астероидов в момент сближения фиксировались.

- Интегрирование движения отобранных астероидов при помощи схемы IAS15 (Rein and Spiegel, 2015) с шагом один час и выделение сближений с Землей на расстояние 0.01 а.е. Интегрирование на данном этапе движения проводилось в упрощенной модели, включавшей Солнце, Землю и астероид.

Такая двухступенчатая методика показала достаточную эффективность в плане скорости вычислений. Поскольку шаг интегрирования не может быть сколь угодно малым, астероид фиксировался не точно на сфере радиусом 0.01 а.е., а с некоторым запозданием, то есть на меньшем расстоянии от Земли (но не более чем на 0.0008 а.е. от границы). Фиксация выходов астероидов из ОКП не проводилась.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Распределения АСЗ, входящих в ОКП по направлениям

По результатам расчета число входов модельных астероидов в ОКП за интервал времени 110 лет составило 9950. На основании этого можно сделать оценку для средней ожидаемой частоты вхождения астероидов в ОКП. Поскольку расчет велся для 1 млн модельных АСЗ, что составляет примерно $1/11.5$ от полной популяции АСЗ размером более 10 м, генерируемой в NEOMOD, ожидаемое число вхождений в ОКП составляет $(9950/110) \times 11.5 \approx 1040$ астероидов в год. Естественно, что большинство таких вхождений осуществляются малоразмерными астероидами. На рис. 1 показано распределение астероидов, входящих в ОКП, по абсолютной звездной величине H . Оно, безусловно, близко к исходному распределению в модели NEOMOD (рис. 1).

Одной из основных задач настоящей работы является определение доли астероидов, приходящих со стороны дневного неба. Для оценки этой величины рассмотрим распределение входящих в ОКП астероидов по углу между направлением на Солнце и направлением на астероид по отношению к наблюдателю, находящемуся на Земле. Оно представлено на рис. 2. Это число АСЗ, пересекающих за год кольцевую поверхность (полоску) шириной 2° и угловым расстоянием от направления на Солнце, показанным на графике. Данное распределение, однако, не отражает плотности потока, поскольку площади полосок сильно различаются. На рис. 3 изображено то же распределение, но каждый столбец теперь нормирован на величину телесного угла соответствующей полоски. На рисунке выделяются повышенная концентрация объектов в направлении на Солнце (0° на рисунке) и в противоположном направлении (180°). Если условно выделить область углов, меньших 90° (соответствует бытовому определению дневного неба), то легко видеть, что около половины входов в ОКП происходит со стороны дневной полусферы. Отметим, что данное распределение по форме близко к полученному ранее при помощи модели NEOPOP с меньшим числом астероидов (Shustov et al., 2017).

Проанализируем теперь распределение потока входящих астероидов по направлениям. Для этого на рассматриваемой сфере, пересечение которой регистрируется, будем использовать систему координат, привязанную к направлению на Солнце, а в качестве основной плоскости возьмем плоскость эклиптики (она будет соответствовать «экватору» на рисунке). Обозначим координаты на сфере: широту ξ и долготу ζ ; при этом $-90^\circ \leq \xi \leq 90^\circ$, а $-180^\circ < \zeta \leq 180^\circ$. Направлению на Солнце всегда соответствует начало координат ($\xi = 0^\circ, \zeta = 0^\circ$), направлению против Солнца — ($\xi = 0^\circ, \zeta = 180^\circ$). В такой системе координат направление, соответствующее направлению вектора скорости Земли (апексу), также фиксировано и задается координатами ($0^\circ, -90^\circ$).

Рисунок 4 иллюстрирует плотность потока входящих АСЗ по направлениям в описанной системе координат. Цветом показано среднее количество астероидов, входящих в ОКП в заданном направлении за год. В распределении имеется явное повышение плотности потока вблизи направлений на Солнце и против Солнца, что отражается и на рис. 3. Кроме того, выделяется область вблизи плоскости эклиптики. Особенно примечательна пониженная плотность в направлениях, соответствующих примерно $-120^\circ < \zeta < -60^\circ$, то есть вблизи апекса Земли. Такого понижения плотности не наблюдается в противоположном направлении, в окрестности $\zeta = 90^\circ$. Говоря простыми словами,

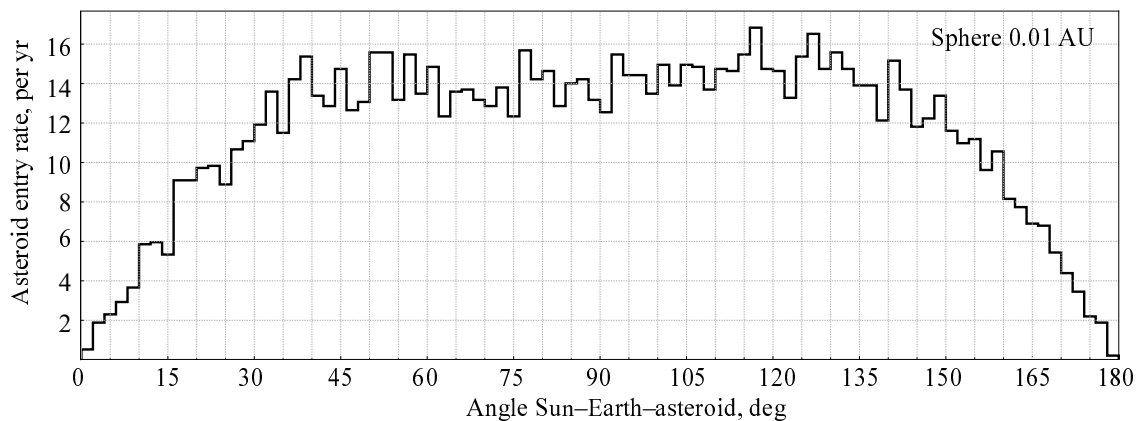


Рис. 2. Распределение модельных астероидов, входящих в ОКП по углу «Солнце – земной наблюдатель – астероид». Направлению на Солнце соответствует 0° . Ширина столбца гистограммы составляет 2° .

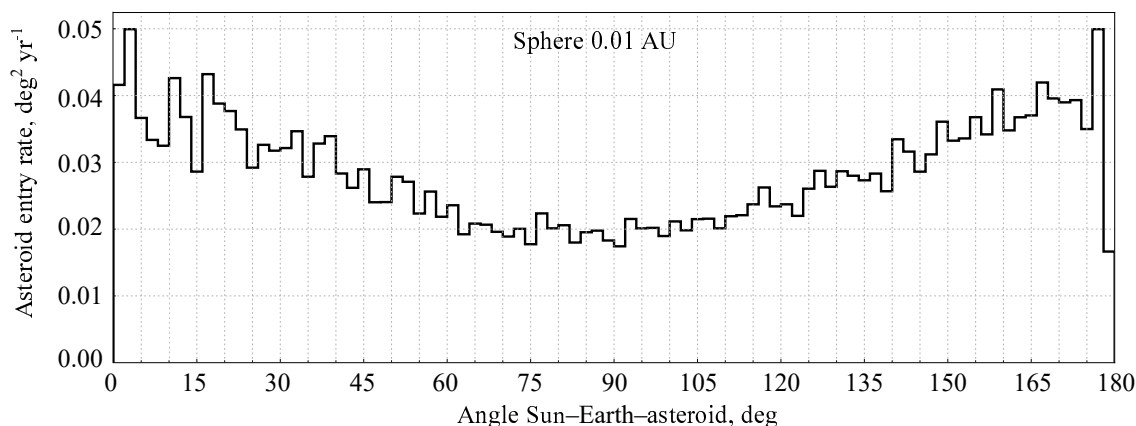


Рис. 3. Распределение плотности потока астероидов, входящих в ОКП, по углу между направлением на Солнце и направлением на астероид. Направлению на Солнце соответствует 0° .

астероидов, «догоняющих» Землю, заметно больше, чем астероидов, которые «догоняет» Земля. Полученный результат, на первый взгляд, может показаться контринтуитивным, поэтому обсудим подробнее вопрос о возникновении в распределении такой асимметрии.

Для астероидов, входящих в ОКП, проанализируем распределение по гелиоцентрическим элементам орбит a и e (см. рис. 5). Цветом показано среднее количество астероидов N , попадающих в каждую ячейку за год, черно-белые линии изображают орбиты с афелийным Q и перигелийным q расстояниями, равными 1 а.е. Эти линии помогают представить область параметров, где для АСЗ возможны входы в ОКП. На рисунке хорошо видно, что повышенная плотность наблюдается вблизи линии $q = 1$ а.е. при $e = 0.4-0.6$ и $a = 2.0-2.5$ а.е. Астероиды с параметрами орбит, находящимися в данной области, испытывают сближения с Землей вблизи перигелия, а значит, в момент сближения имеют большую скорость по сравнению с Землей и «догоняют» ее. Подчеркнем, что повышенная

плотность в отмеченной области соответствует общему распределению среди АСЗ (см., например, Nesvorný et al., 2023). Значительная часть входящих в ОКП астероидов имеет малые наклонения.

Если же представить распределение плотности потока входящих астероидов в обычной эллиптической системе координат, то оно примет вид, показанный на рис. 6, без какого-либо выделенного направления по широте и с несколько повышенной плотностью вблизи плоскости эклиптики.

3.2. Распределение по скорости сближения с Землей

На рис. 7 представлено распределение скорости сближения, то есть скорости изменения расстояния от астероида, входящего в ОКП, до Земли. Максимум распределения приходится примерно на 7.5 км с^{-1} (величина полной пространственной скорости, очевидно, выше). Конечно, при дальнейшем приближении к Земле скорость сближения будет расти. Очень малая доля астероидов, входящих

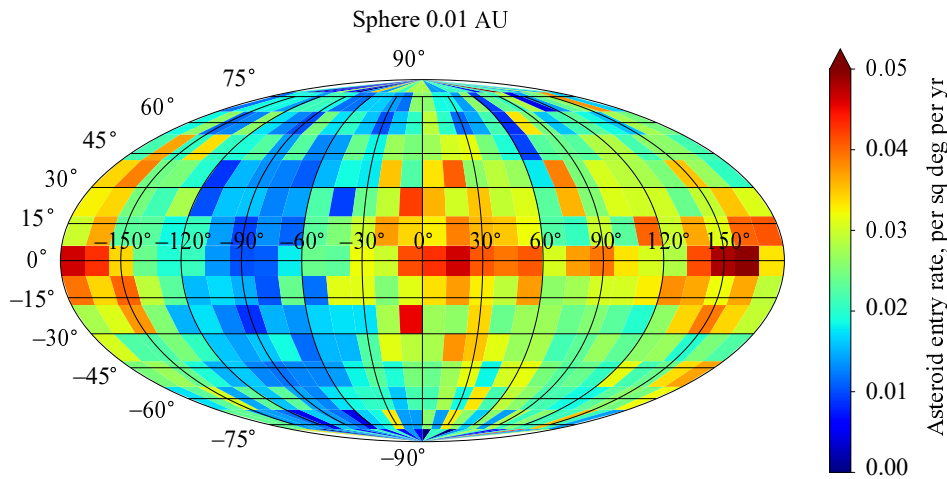


Рис. 4. Распределение плотности потока астероидов, входящих в ОКП, по направлениям.

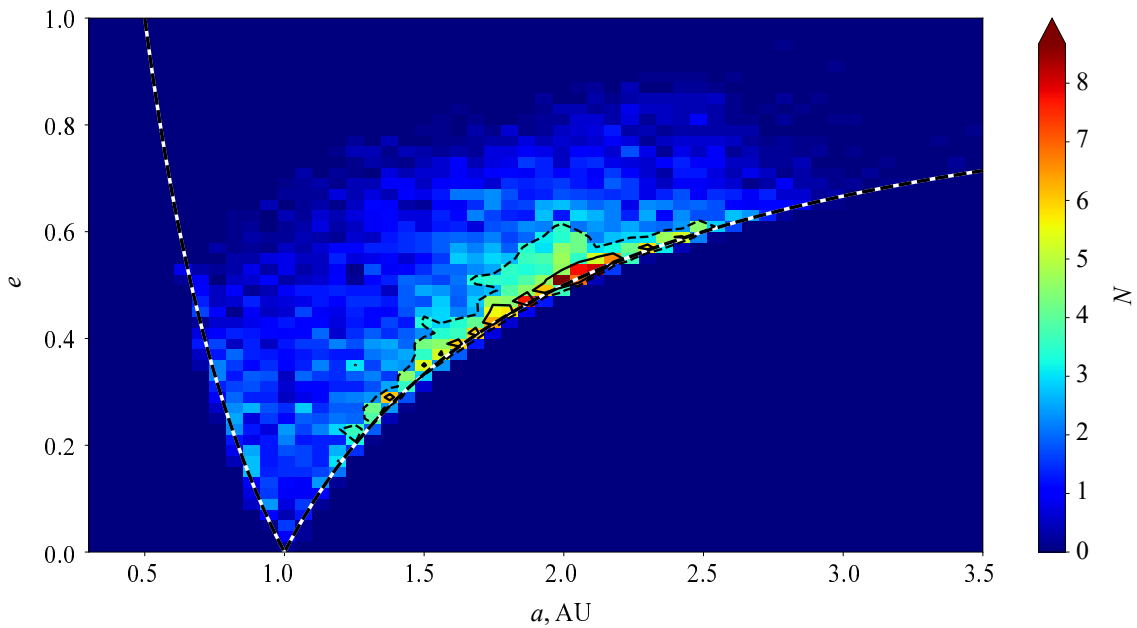


Рис. 5. Распределение потока астероидов, входящих в ОКП, по большой полуоси a и эксцентриситету e ; ширина ячейки по a равна 0.06, ширина ячейки по e составляет 0.02. Цветом показано число N астероидов в ячейке. Штриховым контуром отделена область с $N > 3$, сплошным — область с $N > 5$. Черно-белые линии изображают семейства орбит с афелийным и перигелийным расстояниями, равными 1 а.е.

в ОКП, сближается с Землей со скоростью более 30 км с^{-1} . Форма распределения и положение максимума качественно согласуются с распределением, построенным Naroenkov and Shustov (2012) по имевшимся на тот момент данным.

На рис. 8 показано распределение по скорости сближения с учетом различных направлений. Для его построения мы разбили сферу на ячейки и подсчитали среднюю скорость сближения в пределах ячейки. Ориентация сферы и система координат те же, что и на рис. 4. Можно видеть, что пониженной скоростью выделяются направления вблизи апекса и антиапекса Земли, причем в окрестно-

сти $\zeta = -90^\circ$ область пониженной скорости чуть меньше. Здесь астероиды подходят практически по касательной к рассматриваемой сфере, изображающей границу ОКП.

3.3. Распределения относительно наблюдателя, находящегося в точке L_1 системы Солнце–Земля

Упомянутый в разделе 1 проект «СОДА» предполагает размещение космического телескопа в окрестности точки Лагранжа L_1 системы Солнце–Земля. Рассмотрим распределения параметров вхождений астероидов в ОКП при наблюдении из точки L_1 , то есть перейдем в систему отсчета,

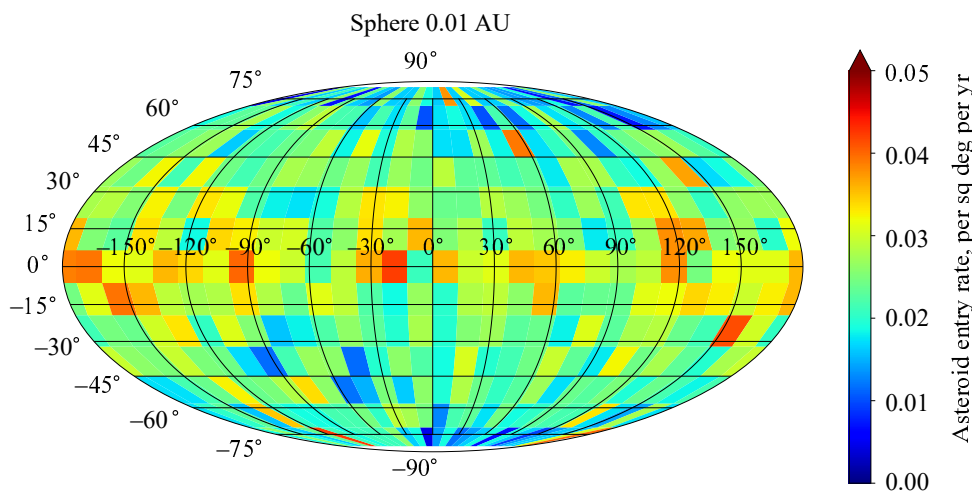


Рис. 6. Распределение плотности потока астероидов, входящих в ОКП, по направлениям в эклиптической системе координат.

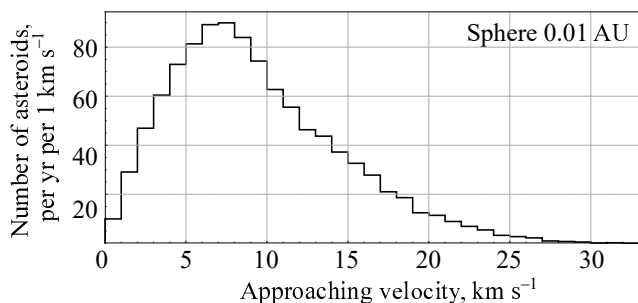


Рис. 7. Распределение астероидов, входящих в ОКП, по скорости сближения с Землей.

связанную не с центром Земли, а с точкой L_1 . Важными характеристиками здесь будут расстояние до астероида и его угловая скорость относительно точки наблюдения. От расстояния при данных отражательных свойствах и размере астероида (фазовый угол при наблюдении с космического аппарата «СОДА» будет примерно одинаковым) зависит видимый блеск, а угловая скорость задает ограничение на время экспозиции, так как «смаз» изображения астероида должен быть приемлемым.

На рис. 9 представлена плотность распределения входящих в ОКП астероидов по расстоянию до точки L_1 и по угловой скорости относительно точки L_1 . Цвет соответствует плотности вероятности (интеграл по всем ячейкам равен единице). Однако следует учесть, что в проекте «СОДА» каждый кадр делается при стабилизации телескопа по звездам. Поэтому величина угловой скорости относительно самого аппарата должна быть существенно больше. Также необходимо иметь в виду, что реально аппарат будет находиться не в точке L_1 , а на некоторой гало-орбите, что даст дополни-

тельную поправку к угловой скорости. Это является предметом детального технического расчета.

3.4. Мгновенное распределение

Для рациональной организации программы поисковых наблюдений АСЗ полезно знать, как они распределены по небесной сфере. Эта задача определяется глубиной обзора. Рассмотрим мгновенное распределение АСЗ по небесной сфере на различных масштабах — в зависимости от размеров охватываемого пространства. Для этого возьмем сферы радиусом 0.5, 1.0 и 2.0 а.е. вокруг Земли и модельную популяцию астероидов размером более 10 м, генерируемую пакетом NEOMOD. Она включает 11.5 млн объектов. На рис. 10 показаны распределения плотности АСЗ на небесной сфере, то есть число астероидов в единичном телесном угле (один квадратный градус). Можно видеть, что чем глубже обзор, тем сильнее распределение АСЗ концентрируется к плоскости эклиптики и, соответственно, в этой области вероятность обнаружения астероида выше. Для ОКП (сфера радиусом 0.01 а.е.) распределение гораздо более изотропно.

Используя модельную популяцию, можно также оценить среднее количество АСЗ, одновременно находящихся в ОКП. Для этого вдоль орбиты Земли мы взяли 90 равноотстоящих друг от друга сфер радиусом 0.01 а.е. и подсчитали количество астероидов, попадающих в каждую сферу. Усредненное число составило 3.8, то есть в среднем в ОКП находится одновременно около четырех астероидов размером 10 м и более.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены особенности распределения АСЗ при их вхождении в околоземное космическое пространство (сферу радиусом 1.5 млн км). С помощью пакета программ NEOMOD была построена

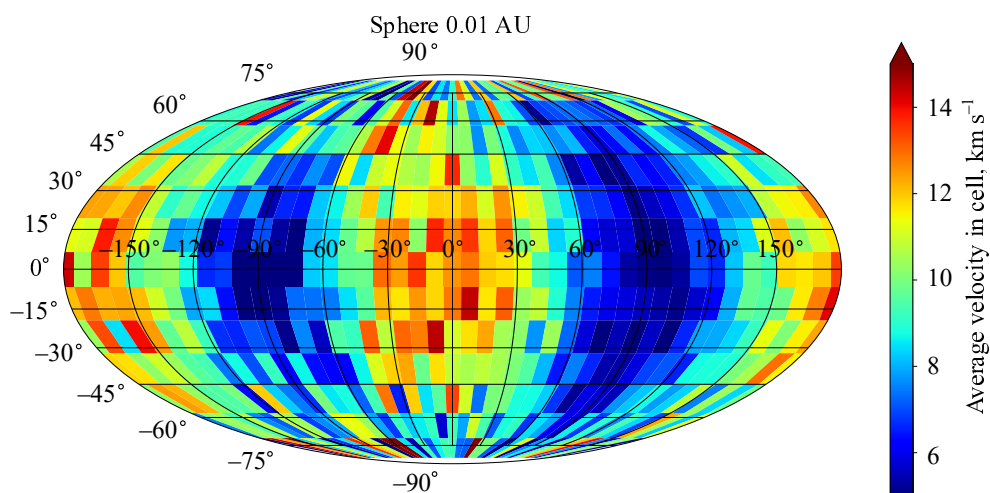


Рис. 8. Распределение по скорости сближения с Землей астероидов, входящих в ОКП, по различным направлениям относительно Солнца (см. пояснение к рис. 4).

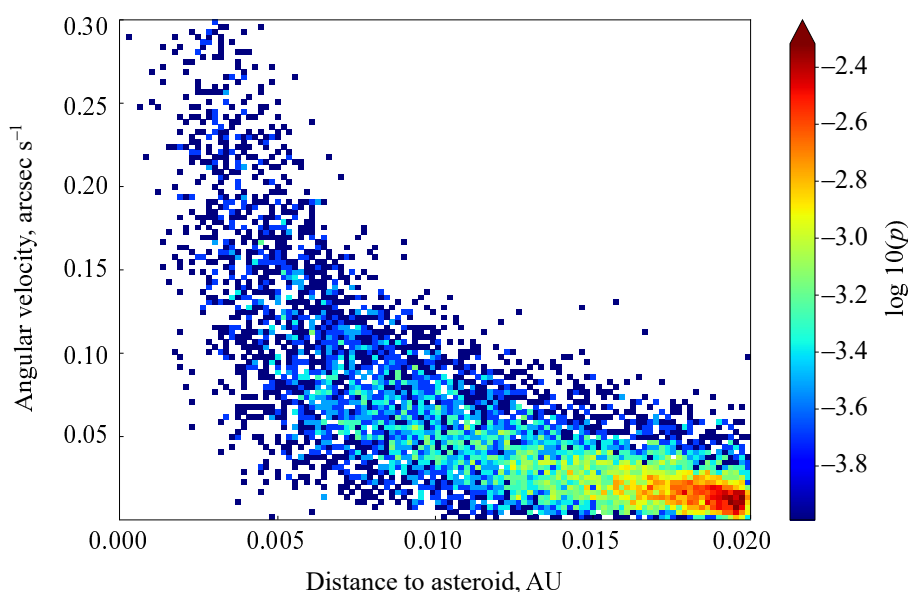


Рис. 9. Плотность распределения астероидов, входящих в ОКП, по расстоянию и угловой скорости относительно точки L_1 системы Солнце–Земля.

модель населения АСЗ с размерами от 10 м, затем посредством комплекса REBOUND мы провели численное интегрирование с фиксацией сближений астероидов с Землей.

В результате вычислений получена оценка частоты входов в ОКП астероидов дециметрового класса, она составляет примерно 1000 в год. При этом в каждый момент времени в ОКП находится в среднем четыре АСЗ. В основном это АСЗ относительно меньшего размера. Необходимо отметить, что оценка для числа дециметровых и более крупных астероидов в полной популяции АСЗ в программе NEOMOD равна примерно 11.5 млн, что значительно отличается от оценки в пакете

NEORPOP, который предсказывает численность порядка 65 млн объектов. В упоминавшемся выше документе «National preparedness strategy for near-earth object hazards and planetary defense» та же оценка составляет порядка 45 млн астероидов. Поэтому для использования количественных оценок необходимо определить предполагаемый размер популяции и масштабировать ожидаемое количество сближений в соответствии с выбранной моделью.

Распределение астероидов по направлениям входа в ОКП неравномерное и имеет повышенную концентрацию вблизи направления на Солнце и противоположном. При этом уменьшенная концентрация наблюдается вблизи апекса Земли, что

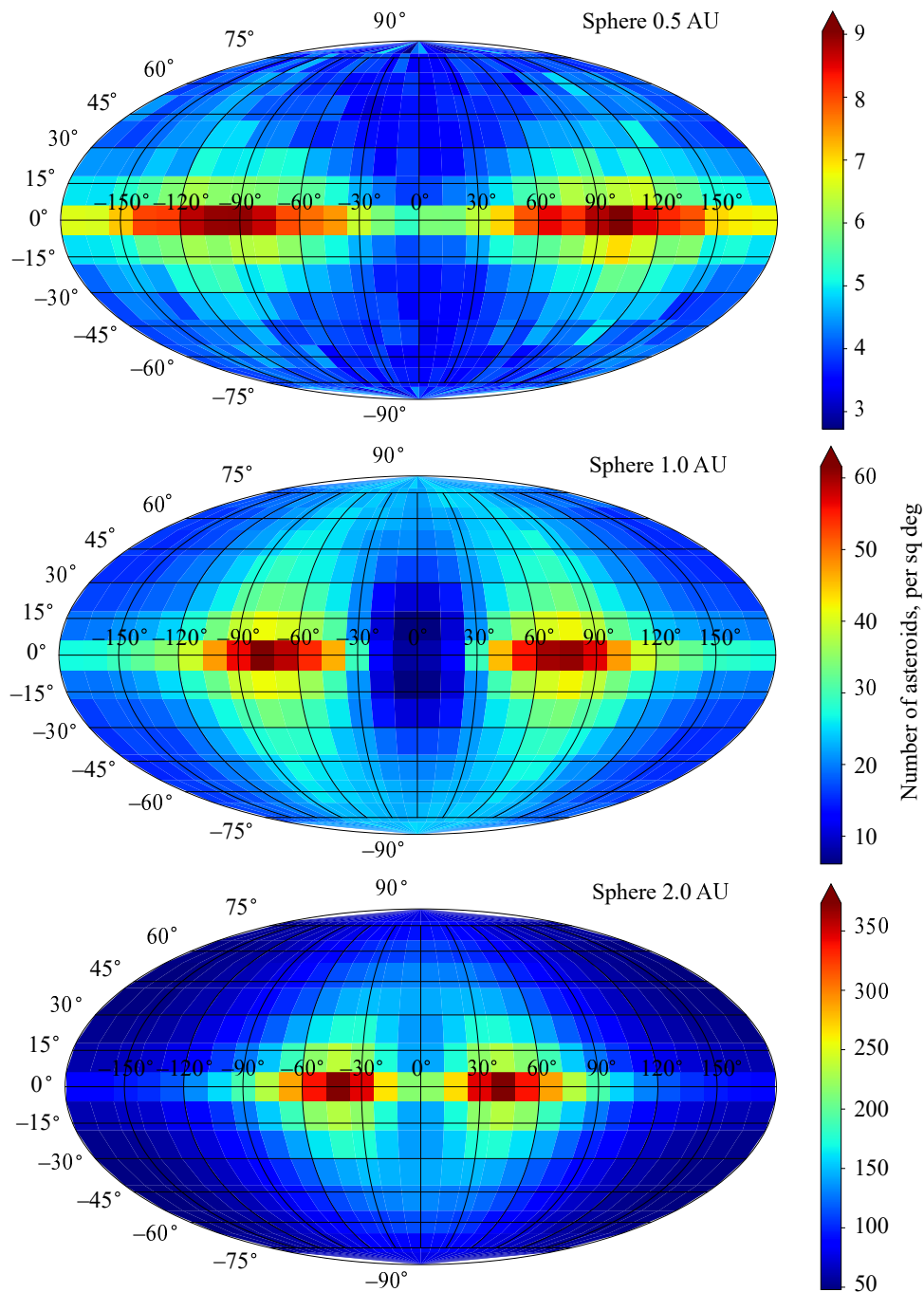


Рис. 10. Распределение АСЗ размером более 10 м на небесной сфере, попадающих в сферу вокруг Земли радиусом 0.5, 1.0 и 2.0 а.е. Система координат та же, что и на рис. 4.

может быть объяснено распределением АСЗ по элементам орбит. Можно отметить некоторую аналогию с распределением радиантов спорадических метеоров (Campbell-Brown, 2008; Li et al., 2022). Данный вопрос будет более детально рассмотрен в последующих работах.

В связи с проблемами астероидно-кометной опасности важным представляется тот факт, что до половины астероидов входят в ОКП со стороны

дневной полусферы и не могут быть обнаружены наземными и околоземными оптическими средствами.

Получено распределение по угловой скорости входящих астероидов для наблюдателя, находящегося в точке Лагранжа L_1 ; характерные угловые скорости не превышают нескольких десятых долей угловой секунды в секунду (относительно направления на Землю).

Скорость сближения АСЗ с Землей на расстоянии 0.01 а.е. в подавляющем большинстве не превышает 30 км с^{-1} . Распределение имеет максимум вблизи 7.5 км с^{-1} . При этом величина скорости сближения меньше в направлениях апекса и антиапекса Земли, что соответствует движению Земли по орбите вблизи плоскости эклиптики.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. D. Campbell-Brown, *Icarus* **196** (1), 144 (2008). DOI:10.1016/j.icarus.2008.02.022
2. M. Granvik, A. Morbidelli, R. Jedicke, et al., *Icarus* **312**, 181 (2018). DOI:10.1016/j.icarus.2018.04.018
3. G. Hahn, M. Granvik, A. Morbidelli, et al., Technical Note, ESA/ESTEC Contract No. 4000106274 (2014).
4. S. V. Koblov, Yu. N. Makarov, and G. G. Stupak, Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisk **683**, 232 (2022). [in Russian]
5. Y. Li, Q. Zhou, J. Urbina, and T.-Y. Huang, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **515** (2), 2088 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac1921
6. S. A. Naroenkov and B. M. Shustov, *Cosmic Research* **50** (3), 221 (2012). DOI:10.1134/S0010952512020074
7. D. Nesvorný, R. Deienno, W. F. Bottke, et al., *Astron. J.* **166** (2), id. 55 (2023). DOI:10.3847/1538-3881/ace040
8. D. Nesvorný, D. Vokrouhlický, F. Shelly, et al., *Icarus* **411**, article id. 115922 (2024). DOI:10.1016/j.icarus.2023.115922
9. H. Rein, D. M. Hernandez, D. Tamayo, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485** (4), 5490 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz769
10. H. Rein and S. F. Liu, *Astron. and Astrophys.* **537**, id. A128 (2012). DOI:10.1051/0004-6361/201118085
11. H. Rein and D. S. Spiegel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **446** (2), 1424 (2015). DOI:10.1093/mnras/stu2164
12. A. S. Shugarov and B. M. Shustov, *INASAN Science Reports* **7**, 85 (2022). DOI:10.51194/INASAN.2022.7.1.014
13. B. M. Shustov, S. A. Naroenkov, and E. V. Efremova, *Solar System Research* **51** (1), 38 (2017). DOI:10.1134/S0038094617010038
14. B. M. Shustov, S. A. Naroenkov, V. V. Emel'yanenko, and A. S. Shugarov, *Solar System Research* **47** (4), 288 (2013). DOI:10.1134/S0038094613040199
15. B. M. Shustov, A. S. Shugarov, S. A. Naroenkov, and M. E. Prokhorov, *Astronomy Reports* **59** (10), 983 (2015). DOI:10.1134/S1063772915100066
16. P. Vereš, R. Jedicke, R. Wainscoat, et al., *Icarus* **203** (2), 472 (2009). DOI:10.1016/j.icarus.2009.05.010
17. R. V. Zolotarev, *INASAN Science Reports* **8**, 1 (2023). DOI:10.51194/INASAN.2023.8.1.001

On the Parameters of Approaches to the Earth by Asteroids

R. V. Zolotarev¹ and B. M. Shustov¹

¹Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

The paper presents the results of statistical modeling of the entry of near-Earth asteroids (NEAs) into near-Earth space (NES)—a sphere with a radius of 0.01 AU around the Earth. Distributions of asteroids by direction and velocity of entry into NES are constructed. The NEA population was modeled using the NEOMOD software with subsequent integration of the dynamic evolution for 110 years using the REBOUND package. It is shown that: 1) the number of asteroids larger than 10 m entering NES is approximately 1000 per year; 2) up to half of the asteroids can enter NES from the dayside hemisphere; 3) the asteroid flux density is increased in the solar and antisolar directions. Typical velocities of approach to the Earth when entering the NES are approximately 7.5 км с^{-1} (the velocities range is from 0 to 30 км с^{-1}). The distribution of entries by distance and velocity relative to an observer located at the Lagrange point L_1 of the Sun—Earth system is also calculated. These distributions can be useful in designing the System of Observation of Daytime Asteroids (SODA).

Keywords: *asteroids: Near-Earth objects*