

УДК 523.44-323.7

Пространственное распределение и направления поиска околоземных астероидов

А. М. Казанцев, Р. В. Макаrchук

Астрономическая обсерватория Киевского университета имени Тараса Шевченко,
04053, Киев-53, ул. Обсерваторная, 3

Исследовано пространственное распределение 600 орбит астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), а также их видимое распределение по небесной сфере при различных значениях долготы Земли. Подтвержден сделанный ранее на значительно меньшей выборке орбит АСЗ вывод о том, что пространственная плотность астероидов, сближающихся с Землей, на эклиптических долготах $\lambda_E = 350...30^\circ$ (сентябрь—октябрь) на 30—50 % выше, чем в иные периоды года. Даны обоснованные рекомендации о наиболее выгодных периодах года и зонах на небе для поисков новых АСЗ.

ПРОСТОРОВИЙ РОЗПОДІЛ ТА НАРЯМКИ ПОШУКУ НАВКОЛОЗЕМНИХ АСТЕРОЇДІВ, Казанцев А. М., Макаrchук Р. В. — Досліджено просторовий розподіл 600 орбіт навколоземних астероїдів (НЗА), а також їх видимий розподіл по небесній сфері при різних значеннях довготи Землі. Підтверджено зроблений раніше на значно меншій вибірці орбіт НЗА висновок про те, що просторова густина навколоземних астероїдів на екліптичних довготах $\lambda_E = 350...30^\circ$ (вересень—жовтень) на 30—50 % більша, ніж в інші періоди року. Приведені обґрунтовані рекомендації по найбільш вигідних періодах року та зонах на небі для пошуків нових НЗА.

SPACE DISTRIBUTION OF NEAR EARTH ASTEROIDS AND LINES OF SEARCH FOR THEM, by Kazantsev A. M., Makarchuk R. V. — We investigate the space distribution of the orbits of 600 near-Earth asteroids and the visible distribution of NEAs over the celestial sphere for different ecliptical longitudes λ_E . The previous conclusion (which was based on a quite small number of NEAs) that the space concentration of NEAs at $\lambda_E = 350...30^\circ$ (September—October) is greater by 30—50 per cent as compared to other periods is confirmed. Well-founded recommendations as to the seasons and zones on the celestial sphere most suitable to the search for new NEAs are given.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), в последнее время в научной печати отводится значительное внимание в связи с вопросом об астероидной опасности. Кроме того, эти объекты представляют и чисто научный интерес, являясь родительскими телами выпадающих на

Землю метеоритов. Мы будем рассматривать как АСЗ те малые планеты, перигелии орбит которых не превышают 1.3 а. е. В подавляющем большинстве минимальное расстояние орбит этих астероидов от орбиты Земли не превышает 0.3 а. е.

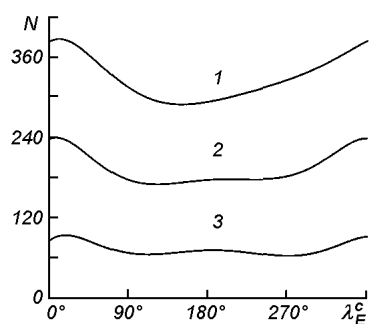
В предыдущей работе одного из авторов [1] уже исследовалось пространственное распределение АСЗ вблизи орбиты Земли. Рассматривались лишь нумерованные АСЗ, которых на тот момент насчитывалось 97. В настоящей работе использованы также орбиты нумерованных АСЗ, взятые в сети INTERNET, и общее число астероидов составило 600. Хотя точность орбит нумерованных астероидов ниже точности орбит нумерованных, для нашей задачи она вполне приемлема. Кроме того, в настоящей статье для разных долгот Земли (периодов года) приведены также геоцентрические экваториальные координаты зон, в которых, согласно приведенным расчетам, вероятность обнаружения новых АСЗ наибольшая.

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПЛОТНОСТИ ОРБИТ АСЗ

Как уже отмечено, для исследования пространственного распределения околоземных астероидов были отобраны орбиты АСЗ с перигелийными расстояниями $q \leq 1.3$ а.е. Хотя речь идет о пространственном распределении АСЗ, распределение самих астероидов в околоземном пространстве мы не рассматривали. Дело в том, что такое распределение быстро изменяется вследствие перемещения астероидов (изменения их средних аномалий). Поэтому мы рассматривали распределение тех точек на орбитах АСЗ, которые расположены на минимальных расстояниях от Земли. Такое распределение можно считать квазипостоянным — его изменения обусловлены изменениями элементов орбит астероидов без учета средней аномалии.

Для этой задачи нами были рассчитаны минимальные расстояния между Землей и каждой из 600 орбит отобранных АСЗ при различных значениях эклиптической долготы Земли λ_E . Значение долготы изменялось от 0 до 360° через 10°. Поскольку нас интересует распределение астероидов непосредственно вблизи Земли, то орбиты, удаленные от Земли на расстояние больше некоторого заданного Δ_{\min} , мы не рассматривали. Таких значений Δ_{\min} было выбрано несколько: 0.5 а. е., 0.3 а. е. и 0.15 а. е.

При каждой паре значений λ_E и Δ_{\min} вычислялось количество N_E орбит АСЗ (т. е. количество орбит, удаленных от Земли при данной долготе на расстояние, не большее Δ_{\min}). Сглаженные зависимости $N_E(\lambda_E)$ представлены на рисунке. Видно, что при долготе Земли $\lambda_E = 350...30^\circ$ околоземное пространство пересекает наибольшее число орбит при всех значениях Δ_{\min} . Значения N_E при этих долготах на 30—50 % превышают соответствующие величины в минимуме распределения ($\lambda_E = 90...150^\circ$). Это подтверждает вывод работы [1], полученный для 97 орбит, согласно которому относитель-



Сглаженные зависимости $N_E(\lambda_E)$ для различных значений Δ_{\min} : 1 — $\Delta_{\min} = 0.5$ а. е.; 2 — $\Delta_{\min} = 0.3$ а. е.; 3 — $\Delta_{\min} = 0.15$ а. е.

ное увеличение числа орбит АСЗ при $\lambda_E = 350\text{—}30^\circ$ характеризует весь комплекс околоземных астероидов. Как отмечено в [1], такая особенность свидетельствует о генетической связи АСЗ с астероидами главного пояса и объясняется влиянием Юпитера.

Из того, что отмеченный максимум наблюдается на распределениях при всех выбранных значениях Δ_{\min} , по-видимому, можно сделать вывод, что такой максимум должен характеризовать и орбиты АСЗ, пересекающие орбиту Земли. По имеющейся выборке астероидов такое заключение проверить нельзя из-за крайне малого количества орбит, пересекающих орбиту Земли. Тем не менее, учитывая генетическую связь АСЗ с астероидами главного пояса, логично предположить такую особенность в распределении и для всего существующего комплекса АСЗ, подавляющее большинство тел которого еще не открыто.

Таким образом, вероятность столкновения Земли с астероидом на долготях $\lambda_E = 350\text{...}30^\circ$ (сентябрь—октябрь) несколько выше, чем в иные периоды года.

НАПРАВЛЕНИЕ ПОИСКА ОКОЛОЗЕМНЫХ АСТЕРОИДОВ

В рамках решения проблемы астероидной опасности поиск и открытие новых АСЗ приобретает первостепенное значение. В работе [3] для этой задачи предлагается чисто технический подход — создание комплекса аппаратуры для обследования всего неба с целью поиска новых АСЗ. На наш взгляд такие поиски будут более эффективными, если знать более выгодное время и область неба. В работе [2] на основании модельных расчетов сделана оценка вероятности обнаружения астероида с заданной орбитой и блеском в период, близкий к весеннему равноденствию. Мы предприняли попытку найти более подходящие периоды и области неба для поиска новых АСЗ, основываясь на распределении всего комплекса этих тел, не привязываясь к элементам каждой конкретной орбиты.

Из изложенного выше следует, что вероятность обнаружения новых АСЗ в сентябре—октябре должна быть больше по сравнению с другими месяцами. Попытаемся найти не только лучшее время для поиска новых АСЗ, но также и наиболее выгодные направления (зоны на небе) для поисковых наблюдений. Такие зоны должны быть в том случае, если все АСЗ распределяются по небесной сфере при некоторых (или при всех) долготах не равномерно, а образуют сгущения в тех или иных направлениях.

Мы не будем рассматривать распределение по небесной сфере самих астероидов, которое не может быть достаточно постоянным. Как и прежде, рассмотрим те точки на их орбитах, которые расположены на минимальных расстояниях от Земли. С этой целью нами использованы те же вычисленные минимальные расстояния между Землей и орбитами отобранных АСЗ при различных значениях долготы Земли λ_E . Для таких точек были определены их геоцентрические экваториальные координаты α и δ . Распределение точек по небесной сфере исследовалось следующим образом. На сфере выбирался полюс — произвольная точка с координатами α_p и δ_p . Затем по удалению s от полюса вся сфера разбивалась на шесть зон от 0° до 180° через 30° . В каждой из зон определялось количество рассматриваемых точек n_i ($i = 1\text{...}6$) и их концентрация c_i — число точек на квадратный градус. Величина такой концентрации определяет заселенность той или иной зоны орбитами АСЗ и является одним из параметров, определяющих среднюю вероятность P обнаружения новых АСЗ в данной зоне. Другие параметры — видимый блеск и вероятность нахождения каждого отдельного астероида в области

Величины, характеризующие пространственную концентрацию и вероятности обнаружения АСЗ для различных долгот Земли при $\Delta_{\min} = 0.3$ а. е.

λ_E , град	N_E	P_{\max}	P_{mid}	P_{\min}	α_Z	δ_Z	α_S	δ_S
0	240	223	55	20	0.0 ^h	2.0°	12.0 ^h	0.0°
20	230	189	53	19	1.2	12.0	13.2	-7.8
40	217	214	50	21	2.0	13.0	14.5	-14.8
60	195	175	45	19	3.4	22.0	15.8	-20.2
80	187	127	44	19	5.0	24.0	17.3	-23.1
100	160	102	38	21	7.0	24.0	18.7	-23.1
120	168	135	39	22	7.8	22.0	20.2	-20.2
140	178	125	42	19	9.8	20.0	21.5	-14.8
160	178	144	42	13	10.9	19.0	22.8	-7.8
180	170	179	39	14	11.6	0.0	24.0	0.0
200	176	168	41	17	12.6	-2.0	1.2	7.8
220	180	134	42	17	15.2	-15.0	2.5	14.8
240	181	139	42	20	16.2	-25.0	3.8	20.2
260	181	144	42	17	18.0	-15.0	5.3	23.1
280	184	151	42	15	18.9	-3.0	6.7	23.1
300	197	159	44	15	20.0	3.0	8.2	20.2
320	223	192	50	17	21.0	10.0	9.5	14.8
340	235	227	53	18	22.6	-7.0	10.8	7.0

рассматриваемой точки (точки на минимальном расстоянии от Земли).

Видимый блеск астероида, в свою очередь, определяется несколькими величинами: размер, альbedo, расстояние от Солнца r и от Земли Δ . Распределения АСЗ в околоземном пространстве по размерам и по альbedo не должны зависеть от геоцентрических координат астероидов, т. е. от номера зоны. Зависимость вероятности обнаружения астероида от Δ частично уже учтена тем, что мы выбирали фиксированные диапазоны значений Δ_{\min} . Итоговая таблица результатов приведена для относительно небольшого диапазона значений $\Delta_{\min} = 0.3$ а. е. Учитывать зависимость от Δ внутри этого диапазона не имеет смысла, поскольку средние значения расстояний АСЗ от Земли для всех зон примерно одинаковы.

Таким образом, для учета зависимости вероятности обнаружения астероида от его яркости в той или иной зоне достаточно определить лишь зависимость от расстояния от Солнца, т. е. $P \propto 1/r^2$. Очевидно, что в направлении «от Солнца» и в направлении «на Солнце» будем наблюдать астероиды на различных гелиоцентрических расстояниях.

Как уже отмечалось, вероятность обнаружения астероида будет также определяться и вероятностью его нахождения в точке наблюдения. Для учета этого фактора можно использовать величину, обратную скорости изменения истинной аномалии астероида при прохождении им рассматриваемой точки — dt/du . Такая величина является относительной характеристикой времени пребывания астероида в данной точке своей орбиты, а значит и времени его пребывания в рассматриваемой точке небесной сферы, т. е. может характеризовать вероятность нахождения астероида в том месте.

Таким образом, искомую вероятность можно записать так:

$$P \propto \frac{1}{r^2} \frac{dt}{du}. \quad (1)$$

Значение dt/du просто определяется из интеграла площадей:

$$\frac{dt}{du} = \frac{r^2}{kp^{1/2}}, \quad (2)$$

где k — постоянный множитель, p — параметр орбиты. Тогда выражение (1) с учетом (2) можно записать

$$P \propto 1/p^{1/2}, \quad (3)$$

и вероятность обнаружения астероида зависит только от параметра его орбиты.

Таким образом, если вместо количества точек n_i в зонах $i = 1...6$ определять суммы с весом каждой точки, определяемым выражением (3), то такие взвешенные суммы n_{wi} , разделенные на площади соответствующих зон, можно считать характеристикой вероятности P_i обнаружения новых АСЗ при наблюдении в той или иной зоне.

При определении вероятностей P_i мы изменяли координаты полюса α_p и δ_p по всей сфере и добивались, чтобы на зону 1 приходилась максимальная вероятность из всех возможных на сфере. Координаты такого полюса, т. е. координаты середины зоны максимальной вероятности мы обозначали α_z и δ_z . Как и в случае определения пространственной плотности орбит АСЗ, такие расчеты были проведены для всех трех выбранных расстояний орбит астероидов от Земли $\Delta_{\min} = 0.5, 0.3, 0.15$ а. е., для каждого из которых эклиптическая долгота Земли λ_E варьировалась от 0 до 360° с интервалом 10° . В таблице приведены результаты для $\Delta_{\min} = 0.3$ а. е. Хотя при других Δ_{\min} качественная картина приблизительно такая же, мы выбрали это значение Δ_{\min} как наиболее соответствующее полученным результатам и наиболее подходящее для наблюдений АСЗ, основанных на этих результатах. Во-первых, следует выбирать диапазон как можно меньших значений расстояний орбит астероидов от Земли, что, естественно, увеличит вероятность обнаружения новых АСЗ. Во-вторых, при очень маленьких значениях Δ_{\min} результаты могут быть статистически недостоверными из-за небольшого числа орбит, попадающих в этот диапазон расстояний. Кроме того, в нашу выборку входят орбиты АСЗ с $q < 1.3$ а. е., и при уменьшении значения Δ_{\min} ниже 0.3 а. е мы автоматически будем уменьшать выборку. Поэтому мы и приняли $\Delta_{\min} = 0.3$ а. е.

В таблице величины λ_E и N_E соответствуют описаниям, сделанным выше. Далее в некоторых относительных единицах приведены вероятности: максимальная, средняя и минимальная. Величина P_{\max} относится к соответствующей зоне 1, координаты центра которой (α_z и δ_z) приведены в последующих графах таблицы. Значение P_{mid} характеризует среднюю вероятность для всей сферы при данной долготе Земли, а P_{\min} — наименьшая вероятность, которая при всех значениях λ_E относится либо к зоне 3, либо к зоне 4. В двух последних графах даны соответствующие геоцентрические экваториальные координаты Солнца (α_s и δ_s). Значения λ_E даны не через 10° , а через 20° , так как все приведенные величины изменяются достаточно плавно.

При каждом значении долготы Земли распределения вероятностей между зонами практически одинаковы. В зоне 1 вероятность в 1.5—2 раза выше вероятности в зоне 6, которая, в свою очередь, в 2 раза превышает вероятности в зонах 2 и 5. Вероятности в зонах 3 и 4 еще меньше в 2—3 раза.

Из таблицы видно, что при всех значениях долготы Земли вероятность в зоне 1 в 3—5 раз превышает среднюю вероятность для всей сферы. Видно также, что координаты центра зоны 1 в большинстве случаев отличаются от соответствующих координат Солнца почти на 180° . Отличия α_z и δ_z от координат антисолнечного направления почти во всем диапазоне долгот Земли лежат в пределах $0-10^\circ$. Только в интервале $\lambda_E = 280...320^\circ$ эти отличия составляют около 20° . Поэтому для поисков новых АСЗ антисолнечное направление наиболее выгодно в течение всего года не только с

точки зрения удобства наблюдений на более темном фоне неба, но и с точки зрения вероятности обнаружения астероидов, вытекающей из их пространственного распределения. Вероятность обнаружения новых АСЗ в зонах неба, удаленных от Солнца на $60\text{--}120^\circ$, крайне мала. Если такая корреляция результатов с направлением на Солнце нуждается в отдельном объяснении, то его несложно получить, исходя из геометрического расположения орбит Земли и АСЗ.

Приведенные в таблице данные позволяют сделать выбор наиболее выгодных периодов года для поисков новых АСЗ. Если говорить о северном полушарии, то, естественно, лучше выбирать зоны с большими значениями склонений. Как видно из таблицы, зоны с наибольшими значениями δ_z приходятся на долготы $60\text{--}160^\circ$ (ноябрь—февраль). Однако вероятности в эти периоды в 1.5—2 раза ниже максимальных — при долготах от 340° до 40° (сентябрь—октябрь). Учитывая, что при долготе 340° соответствующее значение δ_z мало (-7°), наиболее выгодными значениями долгот Земли для поисков новых АСЗ можно считать диапазон от 0° до 40° (конец сентября—октябрь). Для южного полушария более подходящий период будет при $\lambda_E = 320\text{--}360^\circ$ (конец августа — сентябрь).

ВЫВОДЫ

1. Пространственная плотность околоземных астероидов на долготах $\lambda_E = 350\text{--}30^\circ$ (сентябрь—октябрь) на $30\text{--}50\%$ выше, чем в иные периоды года. Такая особенность присуща всему комплексу АСЗ. Поэтому вероятность столкновения Земли с астероидом в этот период также несколько выше.

2. Наиболее выгодными периодами для поисков новых АСЗ в северном полушарии можно считать конец сентября — октябрь, в южном полушарии — конец августа — сентябрь. Причем во всех случаях такие наблюдения следует проводить в антисолнечных зонах неба, где вероятность обнаружения астероидов в 3—5 раз выше, чем в среднем для всей сферы. Вероятность обнаружения новых АСЗ в зонах неба, удаленных от Солнца на $60\text{--}120^\circ$, крайне мала.

1. Казанцев А. М. Визначення просторового розподілу астероїдів поблизу Землі // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 2.—С. 186—188.
2. Bottke W. F., Jedicke R., Morbidelli A., et al. Understanding the distribution of near-Earth asteroids // American Astronomical Society. DPS meeting 31.—1999.—N 28.01.
3. Manly Peter L. Near Earth asteroid densities and their detection before impact // J. Practical Applications in Space.—1990.—2.—P. 33—43.

Поступила в редакцию 23.03.00