

УДК 523.44-32

ДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПАСНЫХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2015 В. В. Емельяненко*, С. А. Нароенков**

Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 2 декабря 2014 года; принята в печать 8 июня 2015 года

Обсуждаются динамические свойства околоземных объектов, проходящих в опасной близости от Земли. Проведены расчеты движения всех наблюдаемых околоземных объектов во временном диапазоне 600 лет: 300 лет в прошлом и 300 лет в будущем. Исследованы динамические характеристики объектов, сближающихся с Землей. В частности, установлено, что наблюдаемое распределение скоростей опасных объектов относительно Земли зависит от их размера. Для опасных объектов с абсолютной величиной $H < 18$ не найдено объектов с относительными скоростями менее 5 км с^{-1} , в то время как 9% наблюдаемых объектов с $H < 27$ проходят вблизи Земли с такими скоростями. С другой стороны, обнаружена тенденция к увеличению относительных скоростей при $H > 29$. На основе анализа данных об астероидах, прошедших на небольших расстояниях от Земли, проведена оценка распределения опасных объектов по абсолютным величинам. Получены оценки частоты столкновения с Землей для объектов различных размеров. Объекты с $H < 18$ сталкиваются с Землей в среднем один раз за 0.53 млн лет. Средний интервал столкновений для объектов с $H < 27$ оценивается в 130–240 лет. Показано, что к настоящему времени обнаружено около 0.1% всех околоземных объектов с диаметром более 10 м. Отмечается, что имеются расхождения в оценках частоты столкновения объектов Челябинского типа, сделанных по наблюдениям болидов и данным телескопических служб наблюдения астероидов. Эти оценки могут быть согласованы, если предположить, что астероиды с размерами порядка Челябинского объекта имеют очень низкое альbedo (в среднем около 0.02).

Ключевые слова: *малые планеты, астероиды*

1. ВВЕДЕНИЕ

Оценки риска соударения малых тел с Землей обычно основываются на динамических и физических характеристиках околоземных объектов (ОЗО — малые тела, движущиеся по орбитам с перигелийными расстояниями $q < 1.3 \text{ а.е.}$). В настоящее время, в первую очередь благодаря развитию специальных программ поиска, число обнаруженных околоземных объектов приближается к 12 000. Есть все основания полагать, что к настоящему времени почти все объекты с абсолютной величиной $H < 18$ уже открыты [1], и это позволяет целенаправленно отслеживать их движение. Однако меньшие объекты также могут приводить к большим разрушениям на поверхности Земли и серьезному ущербу для населения. Например, Тунгусское событие 1908 г. было связано с вхождением в атмосферу Земли объекта размером 30–50 м. Недавнее Челябинское явление было вызвано телом размером от 16 до 19 м [2]. Поэтому оценки

риска соударения с Землей являются необходимыми и для малых астероидов, большая часть которых все еще не обнаружена.

Еще одна проблема в оценке риска, связанного с малыми телами, состоит в том, что динамические характеристики объектов, сталкивающихся с Землей, отличаются от оценок, полученных для всех обнаруженных околоземных объектов [3]. В этом плане невозможно, например, использовать оценки распределения современных орбит всех околоземных объектов с $H < 18$, поскольку большинство таких объектов проходили вдали от Земли в эпоху телескопических наблюдений.

Цель данной работы — оценить динамические особенности небесных тел, которые испытали соударение с Землей или для которых велика вероятность такого соударения. Прямой способ состоит в том, что необходимо рассмотреть характеристики тел, проникновение которых в атмосферу Земли наблюдалось (болидов). Однако число наблюдавшихся болидов, связанных с крупными телами, является небольшим. Фактически только недавнее Челябинское событие дало подробную информацию о вхождении в атмосферу Земли тела с эф-

*E-mail: vvemel@inasan.ru**E-mail: snaroenkov@inasan.ru

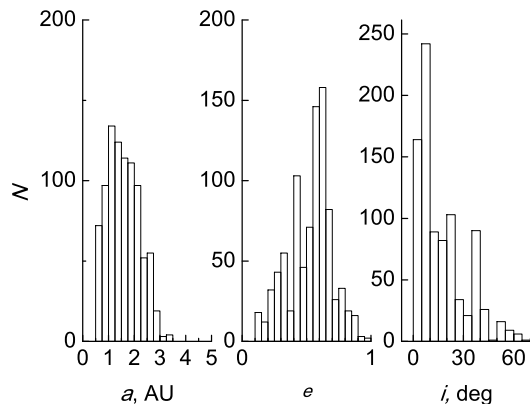


Рис. 1. Число прохождений N объектов с $H < 18$ на минимальном расстоянии $d < 0.05$ а.е. с различными значениями большой полуоси, эксцентриситета и наклона в численных экспериментах.

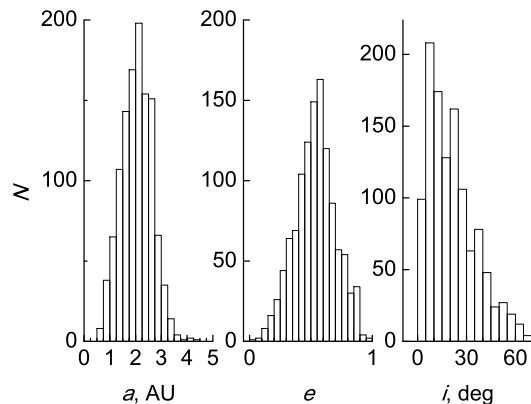


Рис. 2. Число наблюдаемых объектов с $H < 18$ для различных значений большой полуоси, эксцентриситета и наклона.

фективным диаметром $D > 10$ м. Объекты меньших размеров не представляют значительной угрозы, а точность определения доатмосферных орбит по наблюдениям метеорных явлений значительно ниже, чем в случае телескопических наблюдений небесных объектов. Насколько нам известно, телескопические наблюдения небесных тел, столкнувшихся с Землей, были проведены лишь в случае астероидов 2008 TC₃ и 2014 AA. Поэтому в данной работе мы анализируем информацию об астероидах, прошедших на небольших расстояниях d от Земли (как правило, $d < 0.05$ а.е.), надеясь, что они хорошо представляют динамические особенности тех тел, которые сталкиваются с Землей.

2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Для исследования динамических характеристик опасных объектов мы провели интегрирование уравнений движения для всех ОЗО во временном диапазоне 600 лет: 300 лет в прошлом и 300 лет в будущем. Исходные элементы орбиты были взяты из каталога JPL (<http://ssd.jpl.nasa.gov>). Интегрирование проводилось с использованием программы Mercury [4]. Учитывались возмущения от всех планет. Рисунок 1 показывает распределение больших полуосей a , эксцентриситетов e и наклонов i орбит для тех объектов с $H < 18$, которые достигали минимальных расстояний до Земли $d < 0.05$ а.е. в нашем интегрировании. Для сравнения на рис. 2 представлено распределение тех же элементов орбиты для всех наблюдаемых ОЗО с $H < 18$. Основное отличие состоит в распределении большой полуоси: объекты, имеющие большую вероятность столкновения с Землей, обладают в среднем меньшими значениями большой полуоси.

Мы провели также сравнение динамических характеристик опасных ОЗО с разными значениями H . Наиболее контрастные отличия наблюдаются для распределения скоростей U околоземных объектов, близких к столкновению, что иллюстрирует рис. 3 (как обычно, символ U означает относительную скорость без учета гравитационной фокусировки Земли). Здесь представлены распределения относительных скоростей для тех объектов с $H < 18$ и $H < 27$, которые достигали минимальных расстояний до Земли $d < 0.05$ а.е. в нашем интегрировании. Видно, что распределение для крупных объектов смещено в сторону больших значений U . В частности, для объектов с $H < 27$ имеется значительное число прохождений на расстояниях $d < 0.05$ а.е. со скоростями $U < 5$ км с⁻¹, в то время как для объектов с $H < 18$ такие прохождения не зафиксированы. Очевидно, что здесь проявляется наблюдательная селекция, поскольку медленно движущиеся объекты имеют больше шансов быть открытыми. Но могут ли значительные расхождения в распределении относительных скоростей быть полностью связаны с эффектом наблюдательной селекции? Этот вопрос пока остается открытым.

С другой стороны, имеется тенденция к увеличению относительных скоростей с увеличением H для очень малых опасных ОЗО с $H > 29$, как показывает рис. 4. Здесь представлены средние значения скоростей U для объектов со значениями H в каждом интервале длиной в две звездные величины. Штрихи с соответствующими значениями средних скоростей центрированы к середине каждого интервала. Пока можно лишь предполагать, что указанная особенность связана с увеличением доли объектов кометного происхождения в популяции очень малых ОЗО. Отметим, что эти результаты для наблюдаемых ОЗО согласуются

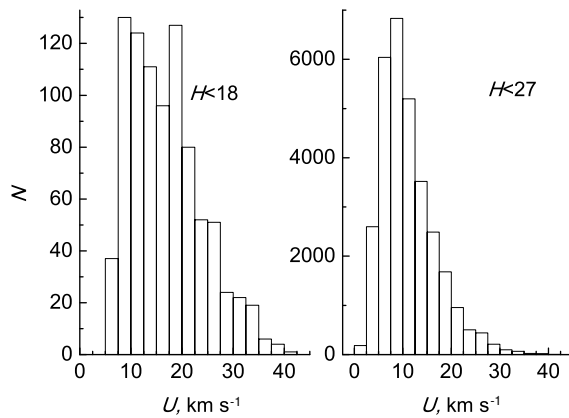


Рис. 3. Число прохождений N объектов с $H < 18$ и $H < 27$ на минимальном расстоянии $d < 0.05$ а.е. с различными значениями скоростей U относительно Земли.

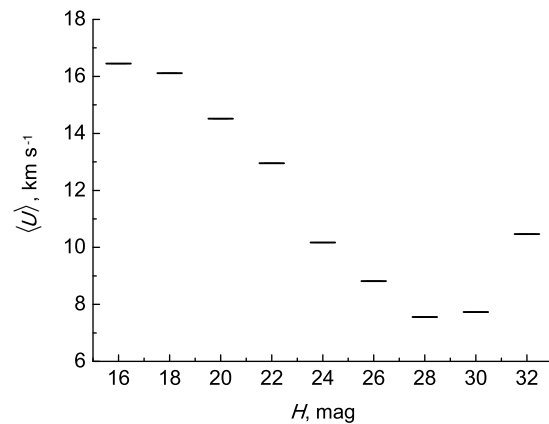


Рис. 4. Значения средних скоростей $\langle U \rangle$ для различных диапазонов H .

с выводами, сделанными в [5] на основе анализа болидных данных.

Наши вычисления позволяют оценить вероятность столкновения ОЗО с Землей. Очевидно, что оценки, полученные непосредственно из интегрирования уравнений движения для наблюдаемых ОЗО, не могут рассматриваться как реальные для малых ОЗО вследствие того, что многие такие тела все еще не обнаружены. Для крупных объектов с $H < 18$ в наших вычислениях было найдено 884 прохождения на минимальном расстоянии $d < 0.05$ а.е. за 600 лет, что соответствует вероятности столкновения с Землей $p_{H < 18} = 1.1 \times 10^{-6}$ в год. Мы берем эту величину за основу для дальнейших оценок. Данная вероятность здесь получена без учета гравитационной фокусировки. Дальнейшее уточнение с учетом гравитационной фокусировки приводится в разделе 4. Для получения вероятности столкновения с Землей ОЗО меньших размеров необходимо оценить величину реального потока таких объектов, что делается в следующем разделе.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ РАЗНОЙ АБСОЛЮТНОЙ ВЕЛИЧИНЫ В ОКРЕСТНОСТИ ЗЕМЛИ

Изучение объектов, которые уже прошли в непосредственной близости от Земли, дает прямую информацию для оценки космических угроз. Важно, что данные о наиболее близких прохождениях тел различных размеров в меньшей степени подвержены эффектам наблюдательной селекции, чем данные для общей совокупности околоземных объектов.

При однородном случайном распределении орбит в околоземном пространстве поток объектов,

проходящих на расстоянии от Земли меньше d , пропорционален площади круга радиусом d (пренебрегая гравитационной фокусировкой на очень малых расстояниях) [6]. Тогда вероятность прохождения на минимальном расстоянии меньше d от Земли пропорциональна d^2 , а плотность распределения расстояний пропорциональна d . Для наблюдаемого распределения околоземных объектов эти закономерности нарушаются, поскольку не все объекты обнаруживаются.

В наибольшей степени возможность открытия объекта зависит от его яркости, что приводит к наблюдательной селекции для объектов различных размеров. Рисунки 5 и 6 иллюстрируют эффект наблюдательной селекции для объектов с $H < 18$ и $H < 28$. Здесь представлено число N обнаруженных ОЗО, проходивших на минимальном расстоянии от Земли меньше d для $H < 18$ и $H < 28$. Сплошные линии соответствуют наблюдаемому распределению, а жирные линии — аппроксимации $N = C d^2$, где C — постоянные. На рисунках видно, что число обнаруженных ОЗО перестает возрастать по параболическому закону, начиная с некоторого расстояния. Это проявление наблюдательной селекции, связанной с наличием пропущенных объектов при ослаблении их яркости. С другой стороны, видно, что до определенного расстояния число обнаруженных объектов возрастает почти пропорционально d^2 , то есть наблюдательная селекция является несущественной в некотором интервале минимальных расстояний. Естественно, что предельное расстояние d^* зависит от рассматриваемых значений H . Например, на рис. 5 и 6 видно, что $d^* \approx 0.2$ а.е. для $H < 18$ и $d^* \approx 0.002$ а.е. для $H < 28$. Таким образом, существует некоторое расстояние d^* , при котором возможность обнаружения объекта, проходящего на минимальном расстоянии от Земли $d < d^*$, не

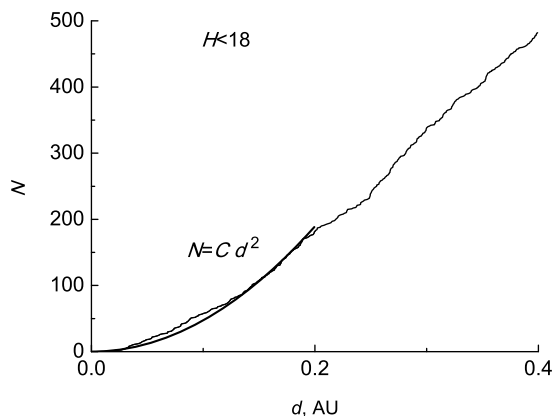


Рис. 5. Число N обнаруженных ОЗО, проходивших на минимальном расстоянии от Земли меньше d , для $H < 18$. Тонкая линия соответствует наблюдаемому распределению; жирная линия — аппроксимация $N = C d^2$, где C — постоянная.

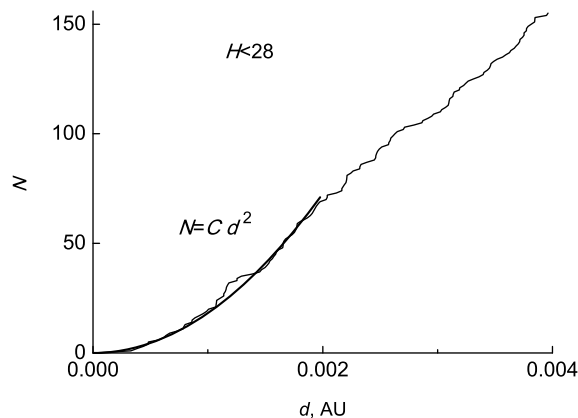


Рис. 6. Число N обнаруженных ОЗО, проходивших на минимальном расстоянии от Земли меньше d , для $H < 28$. Тонкая линия соответствует наблюдаемому распределению; жирная линия — аппроксимация $N = C d^2$, где C — постоянная.

зависит от H , если H меньше определенного значения H^* .

Каталогизацию всех известных астероидов в Солнечной системе ведет Центр малых планет (MPC). В его задачу входит сбор наблюдений всех обсерваторий мира, обработка наблюдений для определения/уточнения орбит астероидов, распространение обработанных данных. Параллельно обработку всех наблюдений, полученных из Центра малых планет, ведет Лаборатория реактивного движения НАСА (JPL). На своем сайте лаборатория публикует орбитальные параметры всех известных астероидов. Из-за того, что на сайте Лаборатории реактивного движения НАСА более удобное оформление обработанных данных, сведения для исследования (в том числе данные, представленные на рис. 5 и 6) были взяты с этого сайта.

Несмотря на большой прогресс в обнаружении ОЗО, достигнутый в этом столетии, каталоги этих объектов являются далеко не полными. Предварительные оценки показывают, что сейчас лишь для тел с размером более 1 км ($H < 18$) можно говорить, что каталог ОЗО почти полон, а доля обнаруженных ОЗО с размерами более 10 м составляет значительно менее 1% [7, 8]. Статистика открытия астероидов в рамках различных поисковых программ представлена по годам в таблице. Из таблицы видно, что основным поставщиком новых околоземных объектов с 2005 г. является обзор Catalina (три телескопа).

Для дальнейшего анализа мы взяли данные из каталога JPL (<http://ssd.jpl.nasa.gov>) об околоземных объектах, обнаруженных в период с января 2005 г. по июнь 2013 г. Выбор этого промежутка времени обусловлен стремлением к однородности данных, которые должны были быть

получены только современными обзорами по поиску малых тел (с начала 2005 г. заработал в полную силу австрало-американский проект Catalina Sky Survey). Большинство ОЗО, обнаруженных к данному моменту, открыты в указанный промежуток времени.

Несмотря на большой вклад обзора Catalina в открытие ОЗО, очень многие проекты также способствовали пополнению списка ОЗО в рассматриваемый период времени. В этих условиях практически невозможно учесть все эффекты наблюдательной селекции для разнообразных условий и инструментов обнаружения ОЗО. Поэтому, стремясь наиболее полно использовать информацию об открытых ОЗО, мы пошли иным путем в обработке наблюдательных данных. Во-первых, мы оценивали не абсолютное количество ОЗО с $H < H^*$, а отношение числа ОЗО в интервалах абсолютных величин, ограниченных различными, но близкими значениями H^* (обычно различие составляло одну звездную величину, см. более подробное пояснение ниже). Во-вторых, мы рассматривали эти отношения в некоторых интервалах минимальных расстояний $d < d^*$, где возможность обнаружения ОЗО не зависит от H для $H < H^*$ (см. рис. 5 и 6 и комментарии к этим рисункам).

Наши начальные рассуждения для нахождения значений d^* сводились к следующему. В наибольшей степени возможность открытия объекта зависит от его звездной величины m , которая на расстоянии d от Земли определяется по формуле $m = H + 5 \lg(s d) + \phi$, где s — гелиоцентрическое расстояние, а ϕ — поправочный член за фазовый угол. Если учесть, что на малых расстояниях от Земли $s \approx 1$ а.е., и предположить, что фазовые поправки ϕ в среднем одинаковы для различных H ,

Статистика открытия астероидов в рамках различных наблюдательных обзоров

Год	LINEAR	NEAT	Spacewatch	LONEOS	Catalina	Pan-STARRS	Другие	Сумма	Процент Catalina
До 2000 г.	316	32	121	20	34	0	338	911	4
2000	258	16	26	38	13	0	12	363	4
2001	277	92	22	42	0	0	6	439	0
2002	288	146	22	21	1	0	11	489	0
2003	235	67	56	55	7	0	17	437	2
2004	304	26	70	39	85	0	12	536	16
2005	136	38	83	41	308	0	20	626	49
2006	96	21	99	19	394	0	8	637	62
2007	112	4	45	12	467	0	10	650	72
2008	140	0	86	1	561	0	16	804	70
2009	109	0	63	0	575	0	35	782	74
2010	104	0	43	0	604	17	147	915	66
2011	70	0	32	0	580	172	38	892	65
2012	55	0	26	0	629	251	33	994	63
2013	3	0	25	0	603	359	48	1038	58

то объект имеет один и тот же блеск в среднем на расстояниях $d^* = \beta \times 10^{-H^*/5}$ а.е. для различных значений абсолютных величин H^* , где β — постоянная. Для проверки верности этого соотношения и оценки значения β мы рассмотрели распределение минимальных расстояний, аналогичных представленным на рис. 5 и 6, для разных предельных значений H^* . Варьируя значения β , мы пытались найти такое значение, которое является статистически достаточным для применения вышеприведенного соотношения при разных H^* . Для этого мы проводили статистические оценки соответствия функции распределения минимальных расстояний d для обнаруженных ОЗО теоретическому распределению $N \sim d^2$ в интервале абсолютных величин от 18^m до 28^m с шагом 1^m . Применение критерия согласия χ^2 показало, что при $\beta = 0.2 \times 10^{18/5}$ для всех H^* в интервале $d < d^*$ имеет место соответствие с уровнем значимости не менее 0.96. Таким образом, в интервале H от 18^m до 28^m зависимость d^* от H^* хорошо представляется формулой $d^* = 0.2 \times 10^{(18-H^*)/5}$ а.е. Используя это соотношение, мы последовательно оценили относительное число ОЗО согласно процедуре, описанной ниже.

Поскольку почти все ОЗО с $H < 18$ обнаружены, то количество ОЗО (поток) с различными значениями абсолютных величин вблизи Земли

оценивалось относительно значения этой величины $\nu_{H<18}$ для объектов с $H < 18$. Для разных диапазонов абсолютных величин использовались разные предельные расстояния d^* согласно вышеприведенной формуле. Наши вычисления для числа N объектов, наблюдавшихся с января 2005 г. по июнь 2013 г., дали следующие результаты:

$$r_1 = \frac{N_{H<19}}{N_{H<18}} = 5.60, \quad d^* = 0.1262;$$

$$r_1 = \frac{N_{H<20}}{N_{H<19}} = 3.00, \quad d^* = 0.0796;$$

...;

$$r_{10} = \frac{N_{H<28}}{N_{H<27}} = 2.88, \quad d^* = 0.00200.$$

Для дальнейшего использования этих результатов для оценки распределения ОЗО по размерам необходимо учесть, что объекты открывались и до января 2005 г. Важность учета этого фактора возрастает с увеличением размеров объектов. Например, из 415 открытых ОЗО с $H < 18$, проходивших на минимальном расстоянии $d < 0.1262$ а.е., 320 ОЗО обнаружены до января 2005 г., и лишь 95 ОЗО — после этой даты.

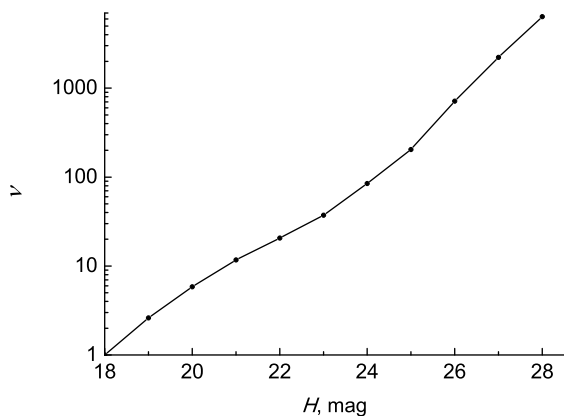


Рис. 7. Функция распределения потока объектов (число ОЗО с абсолютной величиной меньше заданного значения H) в окрестности Земли (поток ОЗО с $H < 18$ принят за единицу).

Общий поток объектов в окрестности Земли состоит из потока объектов, обнаруженных до января 2005 г., и остальной части потока, оцениваемой на основе вышеприведенных отношений. Например, до января 2005 г. было обнаружено 554 ОЗО с $H < 19$, проходивших на минимальном расстоянии $d < 0.1262$ а.е. Это количество соответствует потоку $554 \times \nu_{H < 18} / 415$. Тогда общий поток ОЗО с $H < 19$ составляет

$$\nu_{H < 19} = \frac{95}{415} r_{19} \nu_{H < 18} + \frac{554}{415} \nu_{H < 18} = 2.616 \nu_{H < 18}.$$

Зная величину потока ОЗО с $H < 19$, можно аналогично оценить поток объектов с $H < 20$ в окрестности Земли. Мы выполнили эту процедуру с единичным шагом по H до $H < 28$. Вычисленные таким образом значения для потока ν объектов с H меньше заданной величины представлены на рис. 7. Если зависимость статистической плотности распределения ОЗО от H аппроксимировать функцией $10^{\alpha H}$ на всем интервале значений H , представленном на рис. 7, то $\alpha = 0.38 \pm 0.02$. Однако на рис. 7 видно, что скорость возрастания функции распределения (число объектов с абсолютной величиной меньше заданного значения H) систематически меньше в середине интервала и больше в конце интервала по сравнению с ее значением в начале интервала. Для вышеприведенных оценок наши вычисления дали $\alpha = 0.28 \pm 0.01$ на интервале (18^m5, 20^m5), $\alpha = 0.22 \pm 0.03$ на интервале (20^m5, 22^m5) и $\alpha = 0.49 \pm 0.01$ на интервале (22^m5, 27^m5).

Если учесть, что $H = 18$ приблизительно соответствует километровым астероидам, то при том же альбедо объект с $H = 28$ имеет размер около 10 м. Рисунок 7 показывает, что отношение числа ОЗО с такими размерами составляет приблизительно

6400. Если принять, что это отношение сохраняется для всех ОЗО ($q < 1.3$ а.е.) и число ОЗО с $H < 18$ составляет около 1200, то число ОЗО с $H < 28$ равно приблизительно 7 700 000. Таким образом, в настоящее время открыто лишь порядка 0.001 всех ОЗО с диаметром более 10 м.

4. ЧАСТОТА СТОЛКНОВЕНИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРОВ С ЗЕМЛЕЙ

В разделе 2 оценка вероятности столкновения с Землей для ОЗО с $H < 18$ была получена без рассмотрения гравитационного притяжения Земли. Приблизительно рассчитать этот эффект можно по формуле $b = \rho \sqrt{1 + V_e^2 / U^2}$, где b — минимальное расстояние до Земли, ρ — прицельное расстояние (минимальное расстояние без учета притяжения Земли), $V_e = 11.2$ км с⁻¹ — вторая космическая скорость. Используя значения скоростей U для объектов с $H < 18$, распределение которых показано на рис. 3, мы получили вероятность столкновения с Землей в год $p_{H < 18} = 1.9 \times 10^{-6}$ при учете гравитационной фокусировки для ОЗО с $H < 18$. Данная вероятность соответствует средней частоте столкновения один раз в 0.53 млн лет. Эта оценка близка к результату, полученному в работе [9].

Если предполагать, что меньшие ОЗО имеют те же динамические характеристики, что и объекты с $H < 18$, то, например, объекты с $H < 27$ сталкиваются с Землей в среднем каждые 240 лет. Однако, если для них взять наблюдаемое распределение скоростей (рис. 3), то средний интервал столкновений уменьшается до 130 лет. По-видимому, истинное значение находится между вышеприведенными оценками. Эти оценки находятся в хорошем согласии с предыдущими результатами [5, 7, 8]. В нашем исследовании движения наблюдаемых ОЗО мы нашли, что средний интервал столкновений для объектов с $H < 27$ составляет приблизительно 5500 лет. Таким образом, к настоящему времени открыто лишь 2–4% потенциально опасных объектов с $H < 27$. Рассматриваемые здесь объекты похожи на Челябинское тело (диаметр 17.5 м [2] соответствует $H = 27$ при значении альбедо около 0.1).

В последнее время появились работы [10, 11], в которых утверждается, что наблюдения болидов дают почти на порядок меньшие средние интервалы столкновений для тел с размером порядка Челябинского объекта, чем следует из оценок телескопических служб для астероидов. В частности, в работе [11] утверждается, что это связано с существованием неоткрытой популяции объектов с размерами 10–50 м. Если эта «ненаблюдаемость» объектов связана с низким значением альбедо, то

наши оценки показывают, что для объяснения указанного расхождения между телескопическими и болидными оценками объекты Челябинского типа должны иметь $H \approx 29$ и в среднем альbedo порядка 0.02. Дальнейшие исследования должны показать, насколько свойства поверхности малых астероидов соответствуют этим условиям.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа статистических данных и исследования движения ОЗО можно сделать следующие выводы.

(1) Наблюдаемое распределение скоростей опасных ОЗО относительно Земли зависит от их размера. Для опасных ОЗО с $H < 18$ не найдено объектов с относительными скоростями менее 5 км с^{-1} , в то время как 9% наблюдаемых объектов с $H < 27$ проходят вблизи Земли с такими скоростями. С другой стороны, обнаружена тенденция к увеличению относительных скоростей при $H > 29$.

(2) Получены оценки частоты столкновения с Землей для ОЗО с различными размерами. ОЗО с $H < 18$ сталкиваются с Землей в среднем раз за 0.53 млн лет. Средний интервал столкновений для объектов с $H < 27$ оценивается в 130–240 лет.

(3) К настоящему времени обнаружено лишь около 0.1% всех ОЗО с диаметром более 10 м.

(4) Имеются расхождения в оценках частоты столкновения объектов Челябинского типа по наблюдениям болидов и данным телескопических служб наблюдения астероидов. Эти оценки могут быть согласованы, если предположить, что ОЗО с размерами порядка Челябинского объекта имеют очень низкое альbedo (в среднем порядка 0.02).

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения проекта по федеральной целевой программе

«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (идентификатор RFMEFI1BVB14X0288). Вычисления проведены с использованием суперкомпьютера МВС-100К Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН. Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Committee to Review Near-Earth Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies, Space Studies Board, Aeronautics and Space Engineering Board, Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council, *Defending Planet Earth: Near-Earth Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies* (The National Academies Press, Washington, 2010).
2. V. V. Emelyanenko, O. P. Popova, N. N. Chugai, et al., *Solar System Research* **47**, 240 (2013).
3. S. R. Chesley and T. B. Spahr, in *Mitigation of Hazardous Comets and Asteroids*, Ed. by M. Belton, T. H. Morgan, N. Samarasinha, and D. K. Yeomans (Cambridge University Press, Cambridge, 2004), p. 22.
4. J. E. Chambers, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **304**, 793 (1999).
5. B. A. Ivanov and W. K. Hartmann, in *Treatise on Geophysics*, Ed. by G. Schubert (Elsevier, Amsterdam, 2007), Vol. 10, p. 207.
6. Л. Д. Ландау, М. Е. Лифшиц, *Механика. Электродинамика* (Наука, Москва, 1969).
7. A. W. Harris, in *Proc. Int. Conf. on Asteroid-Comet Hazard—2009, St. Petersburg, Russia, 2009*, Ed. by A. Finkelstein, W. Huebner, and V. Shor (Nauka, St. Petersburg, 2010), p. 312.
8. D. W. Dunham, H. J. Reitsema, E. Lu, et al., *Solar System Research* **47**, 3015 (2013).
9. J. S. Stuart, PhD Thesis (Massachusetts Inst. Technology, 2003).
10. E. A. Silber, D. O. ReVelle, P. G. Brown, and W. N. Edwards, *J. Geophys. Research* **114**, E08006 (2009).
11. P. G. Brown, J. D. Assink, L. Astiz, et al., *Nature* **503**, 238 (2013).

Dynamical Features of Hazardous Near-Earth Objects

V. V. Emel'yanenko and S. A. Naroenkov

We discuss the dynamical features of near-Earth objects moving in dangerous proximity to Earth. We report the computation results for the motions of all observed near-Earth objects over a 600-year-long time period: 300 years in the past and 300 years in the future. We analyze the dynamical features of Earth-approaching objects. In particular, we established that the observed distribution of geocentric velocities of dangerous objects depends on their size. No bodies with geocentric velocities smaller than 5 km s^{-1} have been found among hazardous objects with absolute magnitudes $H < 18$, whereas 9% of observed objects with $H < 27$ pass near Earth moving at such velocities. On the other hand, we found a tendency for geocentric velocities to increase at $H > 29$. We estimated the distribution of absolute magnitudes of hazardous objects based on our analysis of the data for the asteroids that have passed close to Earth. We inferred the Earth-impact frequencies for objects of different sizes. Impacts of objects with $H < 18$ with Earth occur on average once every 0.53 Myr, and impacts of objects with $H < 27$ —once every 130–240 years. We show that currently about 0.1% of all near-Earth objects with diameters greater than 10 m have been discovered. We point out the discrepancies between the estimates of impact rates of Chelyabinsk-type objects, determined from fireball observations and from the data of telescopic asteroid tracking surveys. These estimates can be reconciled assuming that Chelyabinsk-sized asteroids have very low albedos (about 0.02 on average).

Keywords: *minor planets, asteroids: general*