

УДК 523

МЕТОД ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ МАЛЫХ АСТЕРОИДОВ С ЗЕМЛЕЙ

© 2013 г. Дэвид У. Данхэм^{1,2}, Хэрольд Дж. Рейтсема³, Эд Лу³, Роберт Арентц⁴,
Роджер Линфилд⁴, Кларк Чапмэн⁵, Роберт Фаркуар¹, Антон Ледков^{2,6},
Натан Эйсмонт^{2,6}, Евгений Чумаченко²

¹*KinetX, Inc.*

²*Московский институт электроники и математики
Национального исследовательского университета “Высшая школа экономики”*

³*B612 Foundation*

⁴*Ball Aerospace*

⁵*Юго-восточный исследовательский институт*

⁶*Институт космических исследований РАН*

Поступила в редакцию 01.04.2013 г.

Взрыв 17-метрового астероида в атмосфере над Челябинском в России 15 февраля 2013 г. показал, что даже небольшие астероиды могут вызвать существенные повреждения. Наземные телескопы могут обнаружить меньшие, более безопасные объекты, такие как 2008 TC₃ – 4-м астероид, открытый за 20 часов до того, как он взорвался над северо-востоком Судана (Jenniskens и др., 2009). 2008 TC₃ остается единственным астероидом, открытым до падения на Землю, потому что он приближался к Земле с ночной стороны, где его наблюдали большие телескопы в рамках поиска околоземных объектов (Near Earth Object, NEO). Более крупный объект, взорвавшийся над Челябинском, приближался к Земле с дневной стороны по направлению, слишком близкому к направлению на Солнце, чтобы быть замеченным с Земли. Телескоп достаточного размера, помещенный на орбиту вокруг точки либрации L1 системы Солнце–Земля (SE-L1), сможет обнаруживать объекты, похожие на “челябинский” астероид, приближающиеся примерно вдоль линии, направленной на Солнце, с опережением около одних суток перед максимальным сближением с Землей. Такая система будет обладать астрометрической точностью, необходимой для определения времени и зоны падения NEO, траектория которого предполагает столкновение. Это обеспечит как минимум несколько часов (обычно 2–4 дня) для принятия защитных мер, в противоположность интервалу порядка двух минут между вспышкой и приходом ударной волны в Челябинске. Не менее важной причиной предупреждения о таких событиях, в том числе маломощных и безвредных, происходящих высоко в атмосфере с энергией атомной бомбы, является исключение ошибочной регистрации такого события как ядерной атаки, что может спровоцировать разрушительную ядерную войну. Проект использования космического телескопа, похожего на наблюдательный спутник в точке SE-L1, уже разработан компанией B612 Foundation и включает космический телескоп Sentinel на орбите, близкой к Венере, способный обнаружить почти все NEO размером от 140 м, в том числе с орбитами внутри земной, которые трудно найти с наземных телескопов (Lu и др., 2013). Для работы телескопа Sentinel на орбите вокруг SE-L1 на расстоянии 0.01 а. е. от Земли к Солнцу и обнаружения большинства астероидов крупнее 5 м, приближающихся со стороны Солнца, потребуются лишь незначительные изменения конструкции. Такой космический аппарат будет просматривать 165 кв. градусов неба вокруг Земли раз в час и находить астероиды, когда они обладают максимальной яркостью при приближении к Земле. Будут предприняты исследования методом Монте-Карло для определения доли астероидов размером не менее 5 м, приближающихся со стороны Солнца, которые могут быть обнаружены в такой миссии, и ожидаемого запаса времени предупреждения. Кроме того, будет проанализирован охват всех NEO, приближающихся к Земле, включая наблюдения с Земли и с недавно запущенного аппарата NEOSat, который может заполнить пробелы между данными телескопа в SE-L1 и данными наземных обзоров. Многие крупные объекты размером до 50 м, как, например, объект, образовавший Аризонский кратер, не могут быть найдены современными обзорами NEO, но могут наблюдаться описанной возможной миссией, даже если они приближаются по направлению от Солнца. Мы должны быть лучше предупреждены о возможных случаях “грома среди ясного неба” в будущем.

DOI: 10.7868/S0320930X13040117

1. ВВЕДЕНИЕ

Вспышка взорвавшегося метеора, которая была ярче солнца, предоставила жителям Челябинска всего около одной минуты перед тем, как ударная волна достигла их города, вызвала обрушение на цинковом заводе и повредила крыши других зданий. Наибольший ущерб был нанесен из-за разбитых примерно в 4000 зданий окон, причем осколками стекла было ранено около 1500 человек. Окна, выбитые во многих постройках, оказались серьезной угрозой здоровью людей, так как температура воздуха составляла -15°C . Для остекления окон была вызвана помощь, в том числе из Москвы, что позволило починить окна в большинстве государственных зданий, включая школы, в течение выходных дней. Ущерб был оценен в 1 млрд. рублей (около 30 млн. долл. США), что, учитывая более высокий уровень дохода в США, составило бы там в несколько раз большую сумму для сравнимых повреждений. Очевидно, что население Челябинска и многие другие люди были недовольны тем, что они не были предупреждены о такой большой катастрофе. Поначалу существовало много неверных толкований природы произошедшего явления. Так, лидер ЛДПР Владимир Жириновский посчитал это результатом испытаний оружия США (Stewart и др., 2013). Многие в России до сих пор верят, что это были неудачные военные испытания России. Местный православный священник Сергей Секстон сказал: “Возможно, Бог послал своего рода знак” (Stewart и др., 2013). Совершенно верно; и этот знак гласил: “Вам надо серьезнее воспринимать угрозу падений околоземных астероидов, или вас может постигнуть участь динозавров”.

2. ПЕРИОДИЧНОСТЬ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ПАДЕНИЙ АСТЕРОИДОВ

Вероятно, за историю человечества немало людей пострадало или было убито в результате метеорных взрывов в воздухе. Об этом существует несколько свидетельств ранее 1954 г., но ни одно из них не может быть однозначно подтверждено.

Считается, что событие, подобное Челябинскому, происходит в среднем раз в столетие (см. рис. 1). Если бы это было настоящей частотой разрушительных событий, экономически более целесообразным может оказаться не предотвращать столкновение, а просто устранить ущерб от него, вместо того, чтобы запускать системы обзора и обнаружения НЕО. С другой стороны, в других случаях метеоры вызывали или могли вызвать разрушения более чем местного масштаба; например, предполагается, что взрывы масштаба Тунгусского метеорита 17 (30) июня 1908 г. с силой 10–15 мегатонн тротила происходят примерно

раз в 300 лет (Wikipedia, List of Meteor Air Bursts, 2013).

За последние 100 лет сохранилось несколько сообщений о выбитых окнах и других повреждениях от метеоров, большинство из которых были меньше Челябинского метеора и не были достаточно исследованы или задокументированы. Вместе с тем, в 1930-х годах в Южной Америке произошли два случая такого же или даже более крупного масштаба, чем в Челябинске. Список некоторых случаев приведен в таблице.

Можно заметить, что случаи 1993 и 2009 гг. хотя и были мощными, но не принесли ущерба. Метеороид 1993 г., состоявший, вероятно, из вещества низкой плотности, произвел взрыв на большой высоте, из-за чего ударная волна была заметно ослаблена к моменту достижения поверхности. Несмотря на то, что случай 2009 года хорошо наблюдался многими людьми, основной удар пришелся на поверхность океана.

Следует отдельно отметить Сихотэ-Алиньский метеор 1947 г. — падение крупнейшего наблюдавшегося железно-никелевого NEA, размером всего около 4–5 м. В отличие от случая в Челябинске, его разрушение со взрывом, “ярким как Солнце”, произошло на высоте всего лишь 5 км. К счастью, ближайшие постройки находились в десятках километров от области взрыва, благодаря чему сообщений об ущербе или ранениях не поступало. В области падения площадью 2 км² было образовано более 100 кратеров, крупнейший из которых имел размер 26 м, и были обнаружены 23 т метеоритов. Если бы такой объект упал на крупный город, были бы убиты сотни или даже тысячи людей.

В таблице не приводятся случаи повреждения автомобилей или строений небольшими метеорами; это происходит достаточно часто, около раза в год. До события в Челябинске был известен (и хорошо описан) только один случай ранения при падении метеора. Он произошел 28 ноября 1954 г. в городе Силакога, шт. Алабама, США, когда Энни Ходжес была ранена 4-килограммовым метеоритом, который пробил крышу ее дома, разбил радиоприемник и серьезно травмировал ее, пока она отдыхала на диване. Этот дневной метеорит, который наблюдали в 3 штатах, двигался к Земле по направлению от Солнца (Swindel, Jones, 1954).

Кроме того, таблица содержит только падения над сушей (либо близко к ней), в то время как 70% Земли покрыто океанами, где, если только рядом случайно не находится корабль, случаи, аналогичные перечисленным в таблице, остаются незамеченными. Несмотря на то, что крупные города покрывают только 2% площади суши, с ростом населения Земли сельская и пригородная местность также становятся все более густонаселенными. Также, необходимая современной цивилизации инфраструктура (линии электропередач,

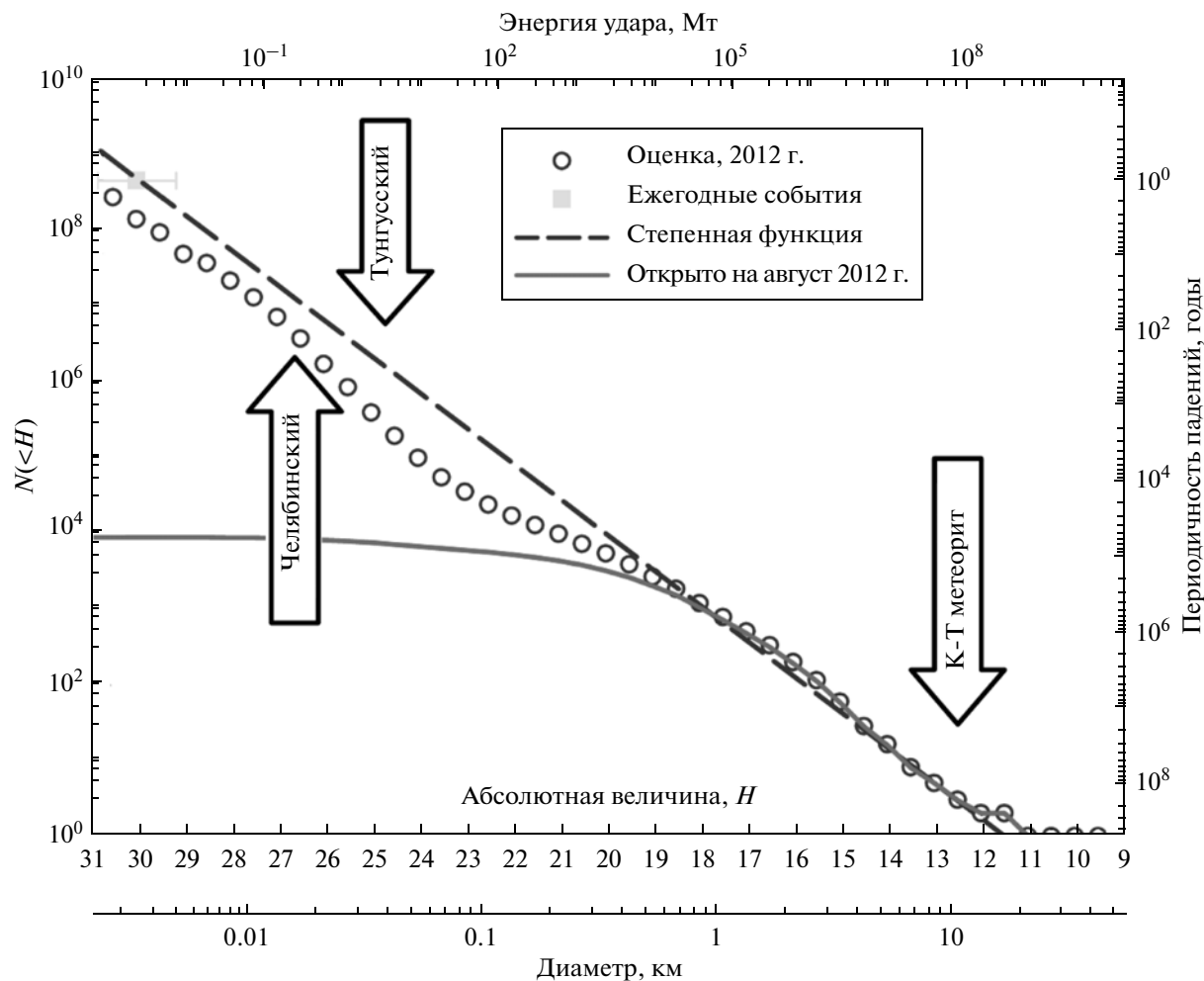


Рис. 1. Текущая оценка числа потенциально опасных NEA (N) в зависимости от их абсолютной величины H (в 1 а. е. от Земли и Солнца). Существуют некоторые различия по спектральным классам, но H приблизительно связана с диаметром астероида (показан внизу серым цветом) и энергией удара в мегатоннах (Мт) тротилового эквивалента (наверху рисунка; приведено для каменных астероидов, более редкие, но плотные железно-никелевые астероиды дают более высокие энергии). Число N связано со средним интервалом падений где-либо на земле, показанным справа. Стрелками показаны Челябинское, Тунгусское и К-Т события, последнее являющееся примерно 10-км астероидом (либо меньшей, но более быстрой кометой), уничтожившим динозавров 65 миллионов лет назад. Варианты этого графика, созданного А.В. Харрис, публиковались в разных источниках; здесь приведена самая свежая версия. Он написал: “Прикрепляю обновленный график в двух форматах с указанием оценки размера Челябинского события. По моей самой последней оценке численности такое событие происходит примерно раз в 200 лет, хотя у меня есть сомнения в последних данных, которые немного ниже, чем предыдущая полученная кривая численности. Предыдущие данные определяли его интервал ближе к 100 годам, но надо быть осторожным при оценке периодичности по одному событию” (Harris, 2013).

газовые магистрали, дороги, башни сотовой связи, оросительные каналы и т.д.) распространяется сейчас на гораздо большие площади. Мы не знаем, когда упадет следующий крупный NEA, который может уничтожить город или даже небольшое государство; это может произойти через двести лет, а может — и завтра. В такой ситуации Землю, вращающуюся вокруг Солнца, можно сравнить с человеком, ведущим автомобиль с затененным ветровым стеклом; без системы предупреждения мы не знаем, когда и насколько мощной будет следующая “авария” (Yeomans, 2013).

Военные спутники на высоких орбитах непрерывно наблюдают за земным шаром, отслеживая испытания атомных бомб и запуски ракет, благодаря чему нам известна периодичность падения крупных метеоров даже над океанами (Nemtchinov и др., 1997). Тем не менее эти наблюдения приходят уже после падения; если мы отслеживаем запуски ракет на Земле, то, возможно, нам надо лучше смотреть и в другую сторону для поиска и предупреждения о NEA, приближающихся к Земле.

Падения метеоров, которые вызвали или могли вызвать разрушения, после Тунгусского (30.06.1908) и до Челябинского (15.02.2013)

Дата	Место	Описание
09.01.1914	Западная Франция	Взрыв метеора выбил окна. Не проверено (Knight-Jadczyk, 2008)
26.11.1919	юг шт. Мичиган, север шт. Индиана, США	Разбитые окна и повреждения на большой площади (The Washington Times, 1919)
24.04.1922	Барнегат, Нью-Джерси, США	Разбиты окна. Не проверено (Knight-Jadczyk, 2008)
13.08.1930	Рио Курака, Бразилия	1-км кратер, назван “Бразильская Тунгуска”, энергия 0.1–1 Мт ТНТ (Raza и др., 2004)
08.12.1932	Арройомолинос-де-Леон, Испания	Разбиты окна, повреждено несколько зданий (Madiedo, Trigo-Rodriguez, 2011)
11.12.1935	Рупуни, Британская Гвиана	Пилот самолета сообщил об уничтоженной полосе джунглей длиной 32 км (Steel, 1996)
12.02.1947	Сихотэ-Алинь, СССР	На площади 2 км ² найдены 23 тонны железных метеоритов, >100 кратеров, крупнейший: 26 м (Gallant, 1996; Divari, 1948)
07.01.1954	Дьепп, Франция	Ослепительная вспышка, выбиты окна (Harris, 2013; Reuters, 1954; A.F.P., 1954)
05.12.1984	Кунео, Италия	Сильный взрыв, выбиты окна; не проверено (Harris, 2013)
19.01.1993	Луго, Италия	Взрыв метеороида низкой плотности на высоте 30 км с силой >10 кт ТНТ (Madiedo, Trigo-Rodriguez, 2011)
08.10.2009	Южный Сулавеси, Индонезия	10-метровый околоземный астероид взорвался над водой с силой 50 кт ТНТ (Yeomans и др., 2009)
11.02.2010	Ауасотепек, Центральная Мексика	На расстоянии многих километров выбиты окна, образован 30-метровый кратер, поврежден мост. Многие факты не проверены (Youtubenews, 2010; Cassiopaea Forum, 2010; García, 2010)

3. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛЫХ АСТЕРОИДОВ, ПРИБЛИЖАЮЩИХСЯ СО СТОРОНЫ СОЛНЦА

В дополнение к обеспечению предупреждения о событиях, аналогичных Челябинскому, ниже перечислены другие причины для поиска небольших астероидов до столкновения с Землей.

3.1. Спасение жизни людей в случае столкновения с более крупными астероидами, не обнаруженными другими способами

В настоящее время около 90% NEA размером от 140 м еще не открыты. Падение столь крупного астероида могло бы стереть с лица земли небольшое государство и вызвать существенные разрушения в радиусе сотен километров. Вероятность падений таких крупных астероидов мала; скорее всего, они происходят только раз в 10000 лет, но это будет слабым утешением, если это произойдет в ближайший год; мы не знаем, когда такое может случиться. Если планы запуска миссии Sentinel будут выполнены (см. раздел 5), мы сможем открыть почти 90% таких крупных астероидов к

2025 г. С другой стороны, объекты размера Тунгусского, способного разрушить большой город с его пригородами, гораздо более многочисленны; в настоящее время известно менее 1% таких объектов, и разрабатываемые обзоры астероидов смогут обнаружить только 50% из них в течение следующих 20 лет. Несмотря на то, что падения астероидов, способные разрушить город, происходят с периодичностью около 300 лет, необходимо обеспечить предупреждение о таких событиях на случай, если это произойдет в течение нашей жизни. Даже если окажется невозможным отклонение или разрушение такого объекта при предупреждении за несколько часов, население сможет эвакуироваться из предсказанной области падения, укрыться под землей либо подняться на достаточную высоту в случае взрыва над океаном, который может вызвать цунами.

3.2. Уменьшение повреждений и ранений от NEA с размерами не больше Челябинского

Более 99.9% NEA крупнее 10 м еще не открыты, причем 90% из них останутся неизвестными даже после работы разрабатываемых сейчас обзо-

ров в течение десятков лет. В случае падения объектов размером 10–25 м, которые могут вызвать повреждения, такие же или более серьезные, чем в Челябинске, предупреждение за несколько часов позволит людям найти укрытие в подвалах зданий или вдали от окон, которые могут быть разбиты, либо даже просто открыть их, чтобы уменьшить силу удара на них и количество осколков. Возможно также будет эвакуироваться из наименее прочных строений, которые могут обрушиться. Как показывает список, приведенный в предыдущем разделе, события, способные разбить окна на большой территории, происходят над сушей приблизительно каждые 10 лет.

Как показывает Сихотэ-Алиньский метеор 1947 г., плотный железно-никелевый NEA размером даже 5 м может вызвать разрушения на площади 1–2 квадратных километра. Периодичность таких событий известна плохо, но ожидается, что большинство из них происходит над малонаселенными районами, как это было в 1947 г. Было бы полезным обеспечивать предупреждение о таких объектах, если они могут упасть на крупный город; возможно, это спасет сотни жизней.

3.3. Улучшение полноты обзоров NEO

Наблюдение небольших объектов телескопом из окрестности точки SE-L1 в режиме, недоступном для большинства других обзоров, позволит улучшить полноту всех обзоров NEO. Разумеется, подавляющее большинство найденных объектов пройдут мимо Земли, но их орбиты могут быть определены для целей последующих наблюдений наземными средствами. Некоторые из этих объектов, вероятно, окажутся довольно большими, с размером даже более 100 м, и в будущем могут представлять угрозу Земле при следующих сближениях через десятки или сотни лет; сведения о них достаточно полезны.

3.4. Предотвращение спровоцированной местной или глобальной ядерной войны

Как заметил генерал США Саймон П. Уорден после сильного (20 кт ТНТ) взрыва метеора над востоком Средиземного моря 6 июня 2002 г., если бы это произошло над крупным городом в Индии или Пакистане, это могло быть ошибочно принято за ядерную атаку и могло спровоцировать обмен ядерными ударами, который бы привел к гибели миллионов людей; Индия и Пакистан находились тогда в состоянии, близком к войне (Bosker, 2002). И хотя более крупный Челябинский метеор не вызвал серьезных последствий в мире, за исключением повышения цены цинка из-за обрушения на цинковом заводе, появились и до сих пор остаются некоторые (отмеченные выше) неверные представления о природе этого

явления. Своевременное предупреждение о таких событиях должно предотвратить потенциально весьма опасную ситуацию.

3.5. Возможность для ученых наблюдать метеоры и получать образцы метеоритов из известных астероидов

Единственным астероидом, открытым до падения на Землю, был 2008 TC₃ — 5-метровый NEA, который взорвался, не причинив вреда, над северо-востоком Судана 7 октября 2008 г. Он был обнаружен только потому, что приближался к Земле с ночной стороны, и небо над Аризоной было ясным, что позволило обзору Каталина открыть его за 20 часов перед взрывом в воздухе. Перед столкновением были проведены спектральные наблюдения этого астероида, а Р. Jenniskens из Института SETI в Калифорнии отправился в Судан и работал с коллегами из Хартумского университета над проведением экспедиции к району падения, где были обнаружены несколько метеоритов, оставшихся после атмосферного взрыва (Jenniskens и др., 2009). Как и в случае этой работы над 2008 TC₃, при предупреждении о NEA, приближающихся к Земле с дневной стороны, ученые смогут быстро отправиться в область падения для сбора метеоритов и даже выполнения наблюдений разрушения метеора в атмосфере (по крайней мере, с самолетов или спутников).

3.6. Туризм

Помимо ученых, многие люди, в том числе астрономы-любители, проявили бы большое желание увидеть впечатляющий взрыв болида в атмосфере и с готовностью оплатили бы поездку к месту предсказанного падения. Некоторые затраты на обслуживание миссии телескопа в SE-L1 могут быть возмещены работой с организаторами таких поездок либо взимания с них платы.

4. ОБЗОРЫ КОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ В ПРОШЛОМ И НАСТОЯЩЕМ

Infrared Astronomical Satellite (IRAS) был запущен 25 января 1983 г. на солнечно-синхронную орбиту вокруг Земли и эксплуатировался 10 месяцев, пока не был израсходован запас жидкого гелия, использовавшегося для охлаждения ИК-детектора. Этот аппарат выполнил первый обзор неба в дальнем ИК-диапазоне. Астероид (3200) Фазтон группы Аполлона был открыт 11 октября 1983 г. Саймоном Грином и Джоном К. Дэвисом при изучении данных, полученных с IRAS; он стал первым астероидом, открытым космическим аппаратом. Аппаратом IRAS были также открыты еще два новых астероида, и эти данные, совмест-

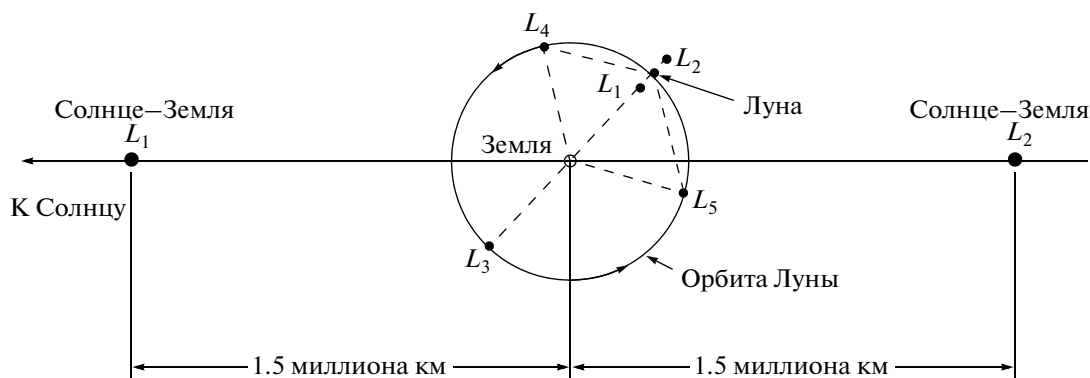


Рис. 2. Семь точек либрации в окрестностях Земли, показанные во вращающейся системе координат.

но с наземными наблюдениями в видимом диапазоне, были использованы для оценки диаметра примерно 2000 астероидов (Dermott и др., 1988). По современным меркам детекторы IRAS имели невысокую чувствительность. Проект SHIELD, направленный Лабораторией прикладной физики университета Джонса Хопкинса в Институт передовых концепций NASA в 1999 г., был первой разработкой, в которой наблюдение NEO проводилось аппаратами Sentry в направлении от Солнца с орбиты, похожей на орбиту Венеры (Gold, 2001). Другие обзоры NEO космическими средствами описаны в соответствующих источниках (Dunham, Genova, 2010).

5. ПРОЕКТ МИССИИ SENTINEL

В 2003 г. NASA поручило Команде научных заданий изучить способы быстрого обзора большинства объектов размером от 140 м, которые могут угрожать Земле. В ответ на это компания Ball Aerospace and Technologies Corporation разработала проект обсерватории “NEO Survey” с использованием одного аппарата, основанного на конструкции весьма успешных космических телескопов Spitzer (инфракрасная обсерватория) и Kepler. Тщательный анализ показал, что 50-см телескоп с пассивным охлаждением и тепловой защитой, работающий в ИК-диапазоне, будет более эффективным для поиска NEO, чем телескоп в видимой области, апертура которого должна равняться 150 см. Дополнительное преимущество наблюдений в ИК-диапазоне в том, что нагретые Солнцем астероиды более яркие относительно звездного фона, и, так как большинство астероидов размером меньше 1 км быстро вращаются, их ИК-излучение гораздо меньше зависит от направления наблюдения, чем для видимого диапазона. Исследования компании Ball показали, что эта миссия может быть выполнена за 600 млн. долларов США (Arentz и др., 2009). NASA не выделило средства на эту миссию, но некоторые шаги по уменьшению ее стоимости были предпри-

няты компанией B612 Foundation, которая теперь выдвигает проект NEO Survey под названием Sentinel (Lu и др., 2013). Используя преимущества размещения аппарата Sentinel на орбите с афелием 0.8 а. е. (достигается маневром облета Венеры) и поле зрения 200°, он должен практически выполнить поставленную NASA цель найти 90% астероидов от 140 м в течение 6.5 лет своего срока эксплуатации. Соглашением между NASA и B612 Foundation обеспечивается предоставление ресурсов сети дальней космической связи (Deep Space Network) для эксплуатации Sentinel, запуск которого планируется на 2018 г.

6. МИССИИ В ТОЧКУ ЛИБРАЦИИ L1 СИСТЕМЫ СОЛНЦЕ–ЗЕМЛЯ

В 1772 г. Жозеф Луи Лагранж показал, что во вращающейся системе двух гравитирующих тел существует пять положений равновесия. Три из этих точек либрации лежат на линии, соединяющей основные два тела (так называемые “коллинеарные” точки либрации на самом деле были открыты Леонардом Эйлером в 1765 г.), а две другие образуют с этими телами равносторонние треугольники. Все пять точек либрации лежат в плоскости орбиты двух тел. Космический аппарат, помещенный в одну из этих точек с соответствующей скоростью, будет находиться в равновесии, потому что его центробежное ускорение будет в точности равно сумме гравитационных ускорений со стороны двух основных тел.

В окрестности Земли находится 7 точек либрации: все 5 точек системы Земля–Луна и две – системы Солнце–Земля (точнее, Солнце и барицентр системы Земля–Луна), как показано на рис. 2 (Farquhar, 2011).

Первым космическим аппаратом, использовавшим орбиты вокруг точек либрации, был третий аппарат International Sun–Earth Explorer (ISEE-3), запущенный NASA в 1978 г. (Farquhar, 1980). Основной миссией ISEE-3 было наблюде-

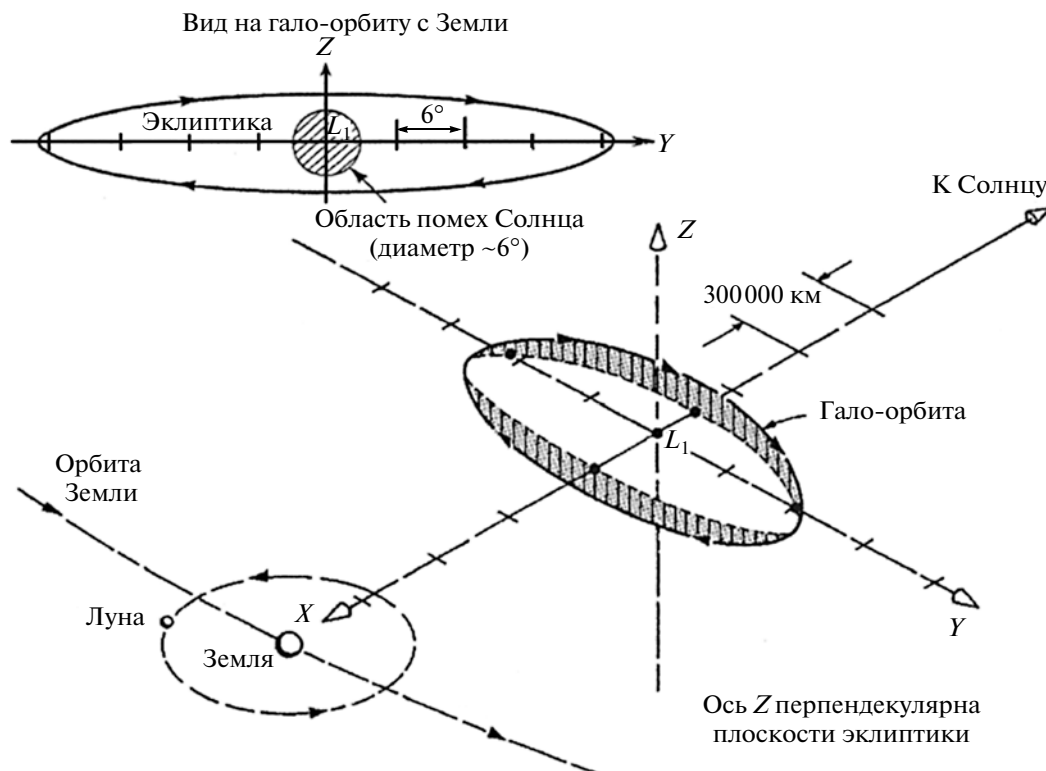


Рис. 3. Показана гало-орбита космического аппарата ISEE-3; амплитуда по оси z составляет 120 000 км, а по оси y — 666 672 км. Вставка (слева наверху) показывает, что орбита избегает область помех от Солнца, обеспечивая непрерывность связи.

ние солнечного ветра до достижения им Земли для измерения потока магнитного поля и заряженных частиц, входящих в земную магнитосферу. Этим требованиям удовлетворяла точка либрации L_1 системы Солнце–Земля (Sun–Earth L_1 , SE- L_1), но космический аппарат в этой точке выглядел бы с Земли находящимся в центре солнечного диска, где электромагнитные помехи нарушали бы радиосвязь. Farquhar и Kamel решили эту проблему в 1973 г., разработав “гало-орбиту” с нужными размерами, для которых периоды в плоскости и перпендикулярно к ней совпадают (Farquhar, Kamel, 1973). На рис. 3 изображена гало-орбита, использовавшаяся ISEE-3; ее период равен 178 суткам, что составляет около полугода.

Аппарат ISEE-3 был запущен 12 августа 1978 г. Верхняя ступень ракеты-носителя Delta выполнила импульс тяги величиной около 3.2 км/с (до орбитальной энергии $-0.6 \text{ км}^2/\text{с}^2$) для перевода аппарата с почти круговой опорной орбиты на 100-дневную траекторию перелета к гало-орбите. Через 18 часов после запуска импульс величиной 18 м/с исправил ошибки вывода на переходную траекторию. Двумя маневрами с суммарным импульсом 36 м/с ISEE-3 был выведен на гало-орбиту. Несмотря на то что гало-орбита неустойчива, применение малых маневров дважды в течение

каждого витка, или примерно каждые 3 месяца, удерживало аппарат на гало-орбите. Жесткий метод управления в этой первой миссии к точке либрации расходовал 8 м/с ΔV в год для поддержания гало-орбиты. Более поздние такие миссии, включая аппараты SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), ACE (Advanced Composition Explorer) и WIND, используют свободный метод “баланса орбитальной энергии” для поддержания своих орбит вокруг точки L_1 системы Солнце–Земля с расходом всего 1 м/с в год (Dunham, Roberts, 2001; Roberts, 2011).

7. КОСМИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП, СЛЕДЯЩИЙ ЗА ОКРЕСТНОСТЬЮ ЗЕМЛИ ИЗ ТОЧКИ SE- L_1

Упомянутый выше космический аппарат SOHO при нахождении на гало-орбите, совпадающей с использовавшейся в ISEE-3, внес огромный вклад в изучение Солнца, наблюдая его почти непрерывно в течение последних 17 лет. Мы предлагаем поместить космический телескоп на похожую орбиту, но направить его в противоположную сторону — на Землю, чтобы непрерывно просматривать ее окрестность на предмет небольших астероидов, которые могут взорваться в земной атмосфере либо пролететь очень близко от

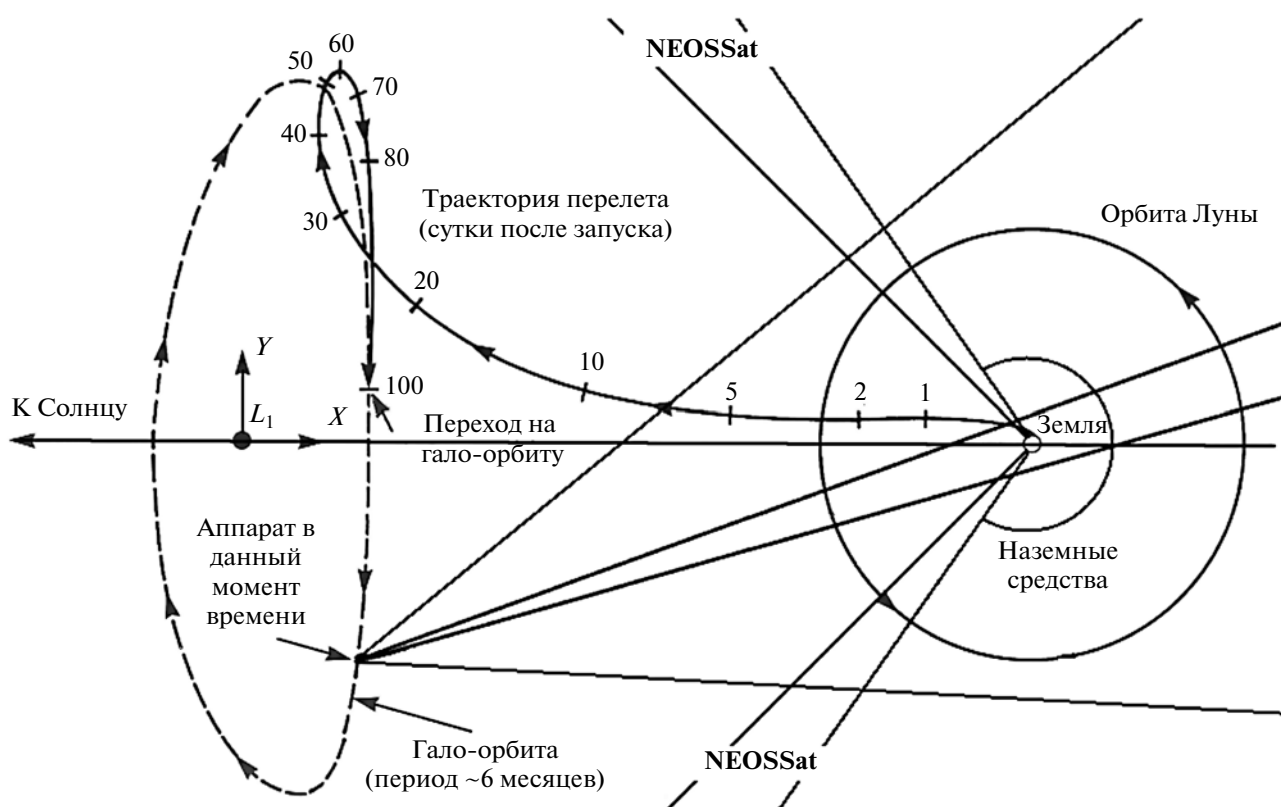


Рис. 4. Наблюдение окрестности Земли с гало-орбиты вокруг SE-L1 для обнаружения астероидов, приближающихся к Земле по направлению от Солнца. Космический аппарат многократно просматривает обширную кольцеобразную область вокруг Земли. Также показаны области, наблюдаемые с Земли и недавно запущенной канадской миссией NEOSSat. Основано на рисунке траектории перелета ISEE-3 к гало-орбите вокруг SE-L1.

нашей планеты (см. рис. 4). Такие объекты, приближающиеся примерно по направлению от Солнца, не могут быть замечены наземными обсерваториями или даже спутниками на околоземных орбитах.

Кольцеобразная область вокруг Земли должна быстро просматриваться. Если обнаруживается объект, приближающийся к Земле, космический аппарат должен провести больше наблюдений для определения его орбиты и эфемерид траектории падения в атмосфере Земли с точностью не хуже 15 км. В ближайшем будущем будут проведены исследования оптимального выбора площади и скорости наблюдений в зависимости от чувствительности. Предварительная оценка для телескопа в видимом диапазоне, рассчитанного на наблюдения на расстоянии до точки либрации L2 системы Солнце–Земля, приведена на рис. 5.

Размер телескопа можно уменьшить, если уменьшить расстояние Δ в два раза до 0.01 а. е. и полагаться на наземные обсерватории и телескопы на околоземной орбите для поиска астероидов, приближающихся с ночной стороны. В особенности для углов между направлением наблюдения и

солнечным светом больше чем 30° чувствительность в видимом диапазоне будет падать.

Для программы NEO Survey компанией Ball было получено, что наблюдения в ИК-диапазоне более эффективны и требуют телескопа меньшего размера (Arentz и др., 2009), что также должно выполняться для телескопа вблизи точки SE-L1. Ожидается, что даже астероиды размером всего 6 м могут быть замечены вариантом 50-см телескопа Sentinel на орбите вокруг SE-L1 при наблюдениях с расстояния 0.01 а. е. от Земли. Могут быть также использованы другие космические аппараты, но применение хорошо проработанной конструкции аппарата Sentinel должно стать более быстрым, надежным и экономичным решением. При использовании варианта Sentinel на орбите вокруг SE-L1 его можно будет назвать SEntinelL1 по аббревиатуре точки L1 системы Солнце–Земля. Внутренний диаметр кольца наблюдения определяется практическими возможностями бленды, исключая влияние излучения Земли; ИК наблюдения не предъявляют к этому больших требований. Внешний диаметр определяется площадью, которая может просматриваться с периодичностью, необходимой для

Исходные данные:

$$\left. \begin{aligned} D &= 8\sim 19 \text{ м} \\ \text{Альбедо} &= 0.15 \\ \Delta &= 0.02 \text{ а.е.} \\ r &= 1 \text{ а.е.} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} H &= 27.5 \\ m &= 19 \end{aligned}$$



(Δ – расстояние от КА до границы видимости
 r – расстояние КА–Солнце)

Предельная наблюдаемая величина
 ($D = 1 \text{ м}$) = 21.5

$$m = 7.1 + 0.5\mu + 2.5\lg \frac{\sqrt{S\lambda T}}{k\Delta}$$

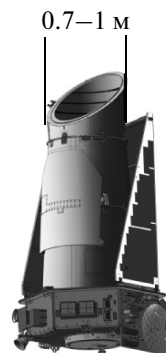


Рис. 5. Расчет размера телескопа, необходимого для наблюдения 8-метрового астероида из точки SE-L1 с выдержкой 1 с.

максимизации вероятности обнаружения астероида, приближающегося к Земле, при получении двух снимков в каждом направлении каждые 24 часа, после чего вся кольцеобразная область просматривается сначала. SEntineL1 может просматривать 165 кв. градусов в час, или 12×165 кв. градусов в сутки при создании в каждом случае пары снимков, разделенных интервалом 1 час. Это покроет площадь почти 2000 кв. градусов вокруг Земли с радиусом около 25° ; на самом деле радиус будет немного больше, так как внутренняя часть круга около 5° от Земли не может наблюдаться, как это описано выше. На расстоянии точки L1 от Земли 1.5 млн. км это позволит найти объекты, удаленные до 0.7 млн. км в небесной плоскости, при расстоянии до Солнца 1 а. е. В случае объекта с относительной скоростью 7 км/с это обеспечит предупреждение за один день до падения. На практике в большинстве реальных ситуаций предупреждение будет более заблаговременным, но некоторые объекты приближаются к Земле с большими скоростями. Следует отметить, что в течение последних нескольких часов на объект действует гравитационное ускорение и относительная скорость возрастает по крайней мере до 11 км/с перед его входом в атмосферу. Очевидно, что для определения наилучшей комбинации периодичности и последовательности обзора необходимо моделирование. В ближайшем будущем будут проведены исследования методом Монте-Карло для определения ожидаемого времени предупреждения и степени полноты обнаружения астероидов на траекториях столкновения с Землей. Для начала

будет использована существующая модель гелиоцентрических орбит NEA, например полученная Ngo и др. (2011), в которой орбиты будут слегка изменены так, чтобы обеспечить столкновения с Землей, половина из которых происходят при движении к Солнцу, половина – от Солнца. Вектор скорости будет варьироваться так, чтобы несколько возможных гиперболических траекторий, достигающих Земли, вызывали столкновения с разных направлений.

8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ДРУГИМИ ОБЗОРАМИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И ОБЩЕЙ ГОТОВНОСТИ

Космический телескоп на гало-орбите вокруг SE-L1 может наблюдать астероиды, приближающиеся к Земле с ночной стороны, равно как и объекты, приближающиеся примерно по направлению от Солнца. С другой стороны, объекты на ночной стороне обычно будут вначале обнаруживаться крупными обзорными телескопами на поверхности Земли (исключения могут быть вызваны мешающими наблюдениям погодой и яркой Луной). Если погода или другие причины не позволяют проводить наблюдения наземными обсерваториями, космический телескоп SEntineL1 сможет находить объекты, приближающиеся с ночной стороны (кроме небольшой области за Землей), размером от 10 м на расстоянии 0.02 или даже 0.03 а. е. (то есть 0.01–0.02 а. е. от Земли). Наземные обсерватории могут просматривать боль-

шой сектор неба более 55° от Солнца, показанный справа на рис. 4, где также обозначена область на 10° ближе к Солнцу, которая теперь наблюдается недавно запущенным аппаратом NEOSat (Szondy, Gizmag, 2013).

Описанные в предыдущем разделе исследования методом Монте-Карло должны быть распространены на наземные обсерватории (что может быть иногда отключено в вычислениях для моделирования плохой погоды), наблюдения NEOSat и наблюдения из всевозможных других источников, которые могут быть полезны (например, запущенная ЕКА миссия Gaia может найти многие приближающиеся к Земле NEA со своей гало-орбиты вокруг SE-L2, но эти данные нуждаются в сложной обработке, что делает их менее полезными для системы предупреждения в реальном времени). В настоящее время наблюдения с наземных обсерваторий отправляются в Центр малых планет (Minor Planet Center, MPC) Международного астрономического союза, который быстро делает их доступными в электронном виде мировому сообществу. В случае обнаружения астероида, приближающегося к Земле, MPC проводит совместный анализ наблюдений с Офисом программы околоземных объектов NASA при Лаборатории реактивного движения для подтверждения деталей опасного объекта и запроса дополнительных наблюдений объектов, представляющих особый интерес, как это было сделано при падении 2008 TC3 в 2008 г. Такой же механизм с быстрым предупреждением MPC должен использоваться при наблюдениях астероидов космическими обсерваториями. С другой стороны, необходимо тщательнее проводить мероприятия по быстрому предупреждению правительств стран, на которые может упасть приближающийся NEA; в 2008 г. Государственный департамент США был проинформирован о предсказанном падении 2008 TC3 в Судане, но никто не смог отправить это сообщение правительству Судана. Соответствующие процедуры сейчас обсуждаются по каналам Организации Объединенных Наций. В скором времени будут созданы процедуры быстрого уведомления об опасных объектах всех, или почти всех стран.

Если описанная выше система обнаруживает астероид, приближающийся к Земле, следующим вопросом будет: “что с ним можно сделать?” Разумеется, все находящиеся в области возможного падения должны быть быстро предупреждены, чтобы они смогли эвакуироваться или другим образом подготовиться к взрыву в атмосфере, и в большинстве случаев это будет наилучшим способом уменьшить ранения и нанесенный ущерб. Но если обнаруживается весьма опасный объект, например 50-м железно-никелевый (аналогичный образовавшему Аризонский кратер около 50000 лет назад) или 100-м каменный объект, нацеленный на густонаселенный район, времени

для организованной эвакуации, вероятнее всего, будет недостаточно и может быть утрачена инфраструктура стоимостью миллиарды долларов (или триллионы рублей), не говоря уже о тысячах или миллионах жизней. При предупреждении за один–три дня, которое может дать эта система, единственным эффективным противодействием будет ракета с ядерным зарядом. Учитывая, что США и СССР могли поддерживать тысячи ракет для мгновенной атаки друг на друга в десятилетия холодной войны (и, конечно, некоторые до сих пор стоят на дежурстве, причем появились и другие страны, обладающие способностью нанести ядерный удар), кажется возможным поддержание Россией и США одной или двух мощных ракет в готовности к запуску по предупреждению за несколько часов для разрушения небольшого приближающегося NEA до того, как он достиг Земли. Конечно, другие методы предотвращения были бы предпочтительнее, но они требуют гораздо большего времени и подходят только когда в распоряжении имеются десятилетия. Иногда утверждается, что фрагментированный NEA может быть более опасным, чем один крупный, но, по нашему мнению, два или три десятка событий Челябинского типа лучше, чем одно событие, аналогичное создавшему Аризонский кратер. Необходимо очень осторожный подход к действиям при открытии каждого опасного астероида; если существует система ядерного противодействия NEA, она должна использоваться только в крайнем случае.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Человечеству очень важно не игнорировать угрозу, исходящую от NEA. Несмотря на то, что катастрофические падения NEA весьма редки, мы пока не знаем, когда произойдет следующий случай; это может случиться при нашей жизни. Наиболее важным в поиске NEA, достаточно больших, чтобы вызвать существенные местные разрушения, являются новые обзоры NEO и такие космические миссии, как Sentinel. Другим легким способом является проект миссии на гало-орбите вокруг SE-L1, описанный выше; это увеличит время предупреждения о небольших объектах, которые, тем не менее, имеют достаточный размер для причинения существенного ущерба в густонаселенных центрах на нашей планете с непрерывно растущей численностью населения. Как написал J. Kluger в своей статье в известном американском журнале, “... когда на карту будет поставлена судьба планеты, нам придется постараться. Одна жизнь может быть и скоротечной, но астероиды будут существовать всегда. Наша защита от них должна быть такой же” (Kluger, 2013). Разумеется, первой защитой является осведомленность о них. Администратор NASA Чарльз Болден недавно

признался в Конгрессе США, что если бы был найден NEA, который должен упасть на Нью-Йорк через три недели, все, что можно было бы сделать – это молиться. В действительности все еще хуже: если бы он приближался со стороны Солнца, предупреждение пришло бы только за три минуты, а не три недели. Нам нужно лучшее предупреждение о событиях Челябинского типа (или более серьезных) для предотвращения “грома среди ясного неба” в будущем; описанный здесь проект значительно повысит вероятность предупреждения за время, достаточное для принятия нужных мер предосторожности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- A.F.P., Le Provençal Newspaper, France, 08.01.1954, 1954.
- Arentz R., Reitsema H., Van Cleve J., Linfield R. NEO Survey: An Efficient Search for Near-Earth Objects by an IR Observatory in a Venus-like Orbit // 1st IAA Planetary Defense Conference: Protecting Earth from Asteroids, Grenada, Spain, 2009.
- Bosker A.J. // Space Daily, 17.09.2002, 2002.
- Cassiopea Forum, <https://cassiopea.org/forum/index.php?topic=16139.15>, 2010.
- Cevolani G., Hajduková M., Foschini L., Trivellone G. Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. 1993. V. 24. P. 117.
- Clavin W., Perotto T. // NASA News 2011-031, http://www.nasa.gov/mission_pages/WISE/news/wise20110201.html, 2011.
- Dermott S.F., Nicholson P.D., Kim Y., et al. // The Impact of IRAS on Asteroidal Science, Lecture Notes in Physics, V. 297, Berlin, Springer, 1988.
- Divari N.B. // Astron. Zhurn. 1948. V. 25. P. 66.
- Dunham D.W., Roberts C.E. // J. Astronaut. Sci. 2001. V. 49. P. 127.
- Dunham D., Genova A. // Cosmic Research. 2010. V. 48. P. 424.
- Farquhar R.W., Kamel A.A. // Celest. Mech. 1973. V. 7. P. 458.
- Farquhar R.W., Heuberger H.S., Muhonen D.P., Newman C.R. // J. Guidance and Control. 1980. V. 3. P. 549.
- Farquhar R.W. Fifty Years on the Space Frontier: Halo Orbits, Comets, Asteroids, and More. Denver: Outskirts Press, 2011.
- Jenniskens P., Shaddad M.H., Numan D., et al. // Nature. 2009. V. 458. P. 485.
- Garía C. El Universal Newspaper, Mexico City, 11.02.2010, 2010.
- Gallant R. // Meteorite. 1996.
- Gold R.E. // Adv. Space Res. 2001. V. 28. P. 1149.
- Harris A.W. // La Cañada, California, personal communication, 2013.
- Kluger J. // Time, V. 181, No. 7, 38, 25.02.2013.
- Knight-Jadczyk L., http://www.bibliotecapleyades.net/ciencia/ciencia_asteroids_comets12.htm, 2008.
- Lu E.T., Reitsema H., Troeltzsch J., Hubbard S. // New Space. 2013. V. 1. P. 42.
- Madiedo J.M., Trigo-Rodríguez J.M. // 42nd Lunar and Planet. Sci. Conf. Houston, Texas, Paper 1368, 2011.
- Nemtchinov I.V., Jacobs C., Tagliaferri E. // Annals New York Acad. Sci. 1997. V. 822. P. 303.
- Ngo H., Greenstreet S., Gladman B. // Proc. EPSC-DPS Joint Meeting, Nantes, France, 2011. P. 284.
- Polsson K. Chronology of World History <http://worldtimeline.info/wor1946may.htm>, 2012.
- Raza R., Martini P.R., Brichta A., et al. // 67th Ann. Meet. Meteorit. Soc., Rio de Janeiro, Brazil. 2004. P. 5150.
- Reuters, Dieppe, France, 07.01.1954, 1954.
- Roberts C.E. // Astrodynamics Specialist Conf., Girdwood, Alaska, 2011. P. AAS 11-495.
- Steel D. // Meteorite. 1996.
- Stewart W., Macrae F., Miller D., Daily Mail, 16.02.2013, <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2279629/Thats-meteor-American-weapon-test-Russian-politicians-bizarre-claim-10-ton-space-rock-Cuba-claims-hit-earlier-week.html>, 2013.
- Swindel G.W., Jones W.B. // Meteoritics. 1954. V. 1. P. 125.
- Szondy D. Gizmag 21.02.2013, <http://www.gizmag.com/neosnat/26337/>, 2013.
- The Straits Times, Singapore, 17.05.1946. P. 1. 1946.
- The Washington Times (Washington, D.C.), 27.11.1919. P. 1b. 1919.
- Wikipedia, List of Meteor Air Bursts, http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_meteor_air_bursts, 2013.
- Yau K., Weissman P., Yeomans D. // Meteoritics. 1994. V. 29. P. 864.
- Yeomans D., Chodas P., Chesley S. NASA Near Earth Object Office report 165, <http://neo.jpl.nasa.gov/news/news165.html>, 2009.
- Yeomans D. Near-Earth Objects – Finding Them before They Find Us, Princeton Univ. Press, 2013.
- Yourtubenews, http://yourtubenews.ning.com/forum/topics/meteor-falls-in-mexico-leaving?commentId=3181219%3AComment%3A50081&xg_source=activity, 2010.