

УДК 523.44+519.878

## АСТРОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

© 2013 г. Б. М. Шустов, С. А. Нароенков, В. В. Емельяненко, А. С. Шугаров

*Институт астрономии РАН, Москва*

Поступила в редакцию 01.04.2013 г.

Для решения стоящей при создании системы противодействия космическим угрозам (астероидно-кометной опасности и космическому мусору) первоочередной практической задачи массового обнаружения опасных небесных тел (ОНТ) необходимо иметь четкие технические требования на проектируемые (создаваемые) инструменты обнаружения. Для конкретизации таких требований (ограничений) проведены специально направленные астрономические исследования фундаментальных свойств ансамбля ОНТ. В работе приведены результаты этих исследований. В части астероидно-кометной опасности введены количественные ограничения на размер ОНТ (50 м), впервые предложены количественные определения угрожающих и столкновительных орбит ОНТ. Показано, что при времени упреждения 30 дней необходимо обнаруживать ОНТ на расстояниях около 1 а. е., что соответствует проникающей силе телескопа  $V \sim 23^m$ . Это означает необходимость создания специализированных широкоугольных, крупноапертурных телескопов. Для обнаружения и мониторинга объектов космического мусора и метеороидов в околоземном космическом пространстве при шкале времени порядка единиц суток эффективны более скоростные инструменты меньшей апертуры, но с большим полем зрения. Приведен пример проекта системы космического базирования, учитывающий обсуждаемые астрономические требования.

DOI: 10.7868/S0320930X1304021X

### ВВЕДЕНИЕ

Челябинское событие 15 февраля является убедительной иллюстрацией угрозы столкновения малых тел Солнечной системы с Землей. Не все тела, могущие столкнуться с Землей, несут серьезную угрозу, а только достаточно крупные. Обычно их называют опасными небесными телами (ОНТ). Существуют уже общепринятые количественные определения некоторых классов ОНТ. Так, под *объектами, сближающимися с Землей* (ОСЗ), понимают астероиды (АСЗ) и кометы, чьи орбиты имеют перигелийное расстояние  $q < 1.3$  а. е. Из их числа выделяют *потенциально опасные объекты* (ПОО), под которыми понимают тела, чьи орбиты сближаются с орбитой Земли до минимального расстояния (МОИД), не превышающего 7.5 млн. км. Основанием для того чтобы считать такие тела опасными, является то обстоятельство, что в таких пределах можно ожидать изменения расстояний между орбитами в обозримом будущем под влиянием планетных возмущений, а также то, что это — характерный масштаб области неопределенности орбиты малого тела (при прогнозировании примерно на сто лет вперед) вследствие неточного знания параметров движения тела в настоящую эпоху. К этому (динамическому) определению ПОО добавляют требо-

вание, чтобы абсолютная астероидная звездная величина  $H$  тела не превосходила 22.0 (<http://neo.jpl.nasa.gov/neo/groups.html>). Для некоторой (средней для астероидов) величины альбедо 0.15 размер сферического тела, имеющего  $H = 22$ , оценивается примерно в 140 м. Есть еще интуитивно понятное, но строгое определение, относящееся к орбитам ОНТ. Орбиту называют столкновительной, если тело, находящееся на такой орбите, неизбежно сталкивается с нашей планетой.

Мы полагаем, что в современных условиях этой классификации уже недостаточно, когда дело касается решения проблемы астероидно-кометной опасности (АКО), т.е. угрозы столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы (астероидами и кометами) с причинением серьезного ущерба населению планеты вплоть до уничтожения человечества.

Как обсуждается в работе (Шустов и др., 2013), нижнюю границу размеров опасного, в смысле данного в предыдущем предложении определения АКО, небесного тела, разумно определить в 50 м (примерные размеры Тунгусского тела). Средняя оценка энергии, выделяющейся при столкновении такого тела с Землей, сравнима с энергией взрыва очень мощного термоядерного устройства. Крупные тела падают на Землю гораз-

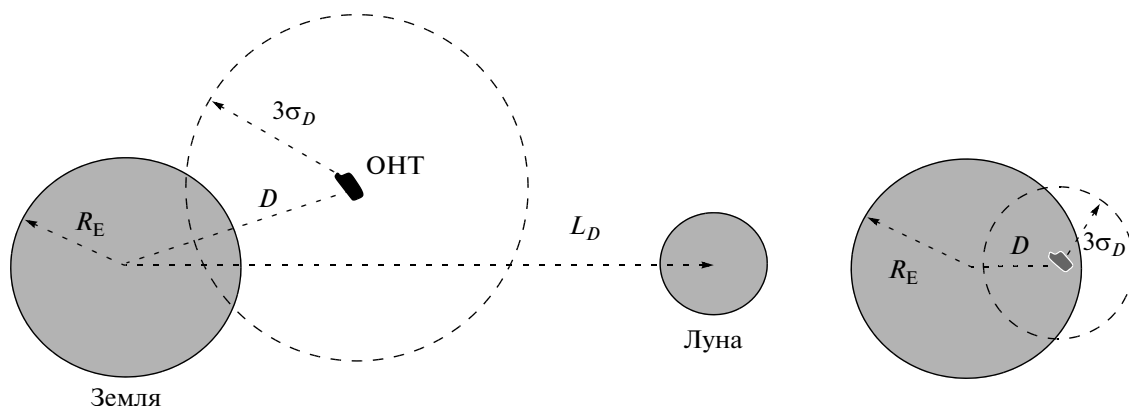


Рис. 1. К определениям угрожающего (слева) и столкновительного (справа) опасного небесного тела (ОНТ). См. в тексте.

до реже. Для тел размером ~1 км частота столкновений оценивается как 1 раз примерно в миллион лет. Именно поэтому столкновения с телами размером 50–500 м, которые неоднократно происходили за время существования нашего биологического вида, составляют главное содержание АКО. В (Шустов и др., 2013) также отмечается, что небесное тело, взорвавшееся над Челябинском, не относится к классу опасных в смысле АКО, хотя при менее пологой траектории входа метеороида в атмосферу последствия взрыва могли быть гораздо более катастрофическими, чем они были.

Итак, мы предлагаем изменить определение ПОО в смысле изменения нижней границы размеров тела со 140 до 50 м. Кроме уточнения нижней границы размеров опасного тела мы вводим дополнительные определения динамических (точнее орбитальных) классов ОНТ. Предлагается называть ПОО (и, соответственно, его орбиту) **угрожающими**, если, с одной стороны, оценка его расстояния  $D$  до центра Земли не превышает радиуса  $L_D$  лунной орбиты, а с другой, — зона рассеяния орбит, размер которой (радиус) определяется как  $3\sigma_D$  ( $\sigma_D$  — среднеквадратичная ошибка определения величины  $D$ ), как минимум касается планеты Земля ( $R_E$  — радиус Земли), т.е.

$$D < L_D \text{ и } D - 3\sigma_D < R_E, \quad (1)$$

и **столкновительными**, если выполняются условия

$$D < R_E \text{ и } 3\sigma_D < R_E. \quad (2)$$

Это определение не вполне строго соответствует неизбежности столкновения, так как вероятность столкновения для такого тела (орбиты) несколько меньше 50%. Но, конечно, все мероприятия по противодействию такому столкновению будут такими же, как и в случае 100% вероятности столкновения. На рис. 1 проиллюстрированы эти условия для определения угрожающего и столкновительного тела.

Проблема АКО, будучи проблемой, изучаемой фундаментальной наукой, имеет также выраженный практический характер. Выделяют следующие основные составляющие проблемы АКО, требующие практического решения.

1. Проблема обнаружения (выявления) всех опасных тел.
2. Проблема определения степени угрозы (оценка рисков) и принятия решений.
3. Проблема противодействия и уменьшения ущерба.

Практическая проблема АКО требует создания механизма принятия конкретных решений по противодействию этой космической угрозе. Любой механизм принятия решений строится на вполне конкретных критериях, и они, эти критерии, должны быть четко прописаны и обоснованы. Выбор критериев зависит от решаемой задачи. Например, важным компонентом критерия интегрального характера, описывающего риск столкновения (см. проблему 2 в списке выше), можно считать количественные оценки, заложенные в Туринской или Палермской шкалах.

Первоочередной задачей из перечисленных выше является решение проблемы 1, т.е. проблемы обнаружения опасных небесных тел. Ситуация здесь очень острая. Достаточно сказать, что количество тел, сравнимых или превышающих по размерам Тунгусское тело и являющихся потенциально опасными в смысле определения ПОО, оценивается не менее чем в 200–300 тысяч, а открыто их пока не более 2%! Это, кстати, означает, что неожиданное появление опасных тел вблизи Земли — не исключение, а типичная ситуация и на принятие мер по противодействию и уменьшению ущерба может быть очень мало времени.

Для решения практической задачи выбора или создания наиболее эффективных инструментов и

методов обнаружения ОНТ весьма важно иметь ограничения не только на размер обнаруживаемого тела (и, возможно, фотометрические характеристики его поверхности), но и задать характерные времена задачи. Для оптимизации программы наблюдений важно также знать, какие области небесной сферы наиболее населены (на момент проведения наблюдений) опасными небесными телами. Для конкретизации подобных ограничений (требований) большое значение имеют специально направленные астрономические исследования. Ниже мы приводим результаты некоторых таких исследований, направленных на количественную конкретизацию астрономических ограничений, описывающих ансамбль ОНТ.

### ГДЕ НА НЕБЕСНОЙ СФЕРЕ НУЖНО ИСКАТЬ ОПАСНЫЕ НЕБЕСНЫЕ ТЕЛА?

Задача обнаружения не может ставиться как задача *полного* выявления всех опасных тел. Это невозможно. Поэтому ставится задача *массового* (например, не менее 90%) выявления ОНТ. По данным Центра малых планет (ЦМП) при Международном астрономическом союзе (<http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/mpc.html>) подавляющее большинство ПОО составляют астероиды. На конец декабря 2012 г. количество потенциально опасных астероидов в “старом” определении этого термина (см. Введение) составило 1350, а если пользоваться новым определением ПОО, введенным выше в данной статье, то таких объектов насчитывается уже более 3300. К сожалению, как уже отмечалось, доля необнаруженных потенциально опасных астероидов размером от 50 м очень велика (~98%), и о свойствах распределений таких тел можно делать лишь некоторые предположения. В дальнейшем мы будем предполагать, что свойства пространственного распределения для этого “малоразмерного”, еще практически неоткрытого, населения близки к относительно хорошо изученным свойствам распределений более крупных тел.

Рассмотрим пространственное распределение крупных астероидов. Конечно, более логичным было бы проводить рассмотрение ансамбля потенциально опасных крупных астероидов, но их число недостаточно (немногим более 100) для проведения статистического анализа. Поэтому мы рассматриваем более широкий класс объектов — астероиды, сближающиеся с Землей. Считается, что на данный момент открыты более 95% всех астероидов, сближающихся с орбитой Земли, с  $H < 18$  (т.е. километровых и более размеров) (Committee to review..., 2010). Мы провели оценку параметров распределений АСЗ именно по данным для АСЗ с  $H < 18$ . Широтное и радиальное

распределение малых АСЗ, в отличие от долготного распределения, явно подвержено эффектам наблюдательной селекции. Поэтому использование орбитального распределения для всех обнаруженных АСЗ может привести к значительным ошибкам для исследуемых параметров (Емельяненко и др., 2011).

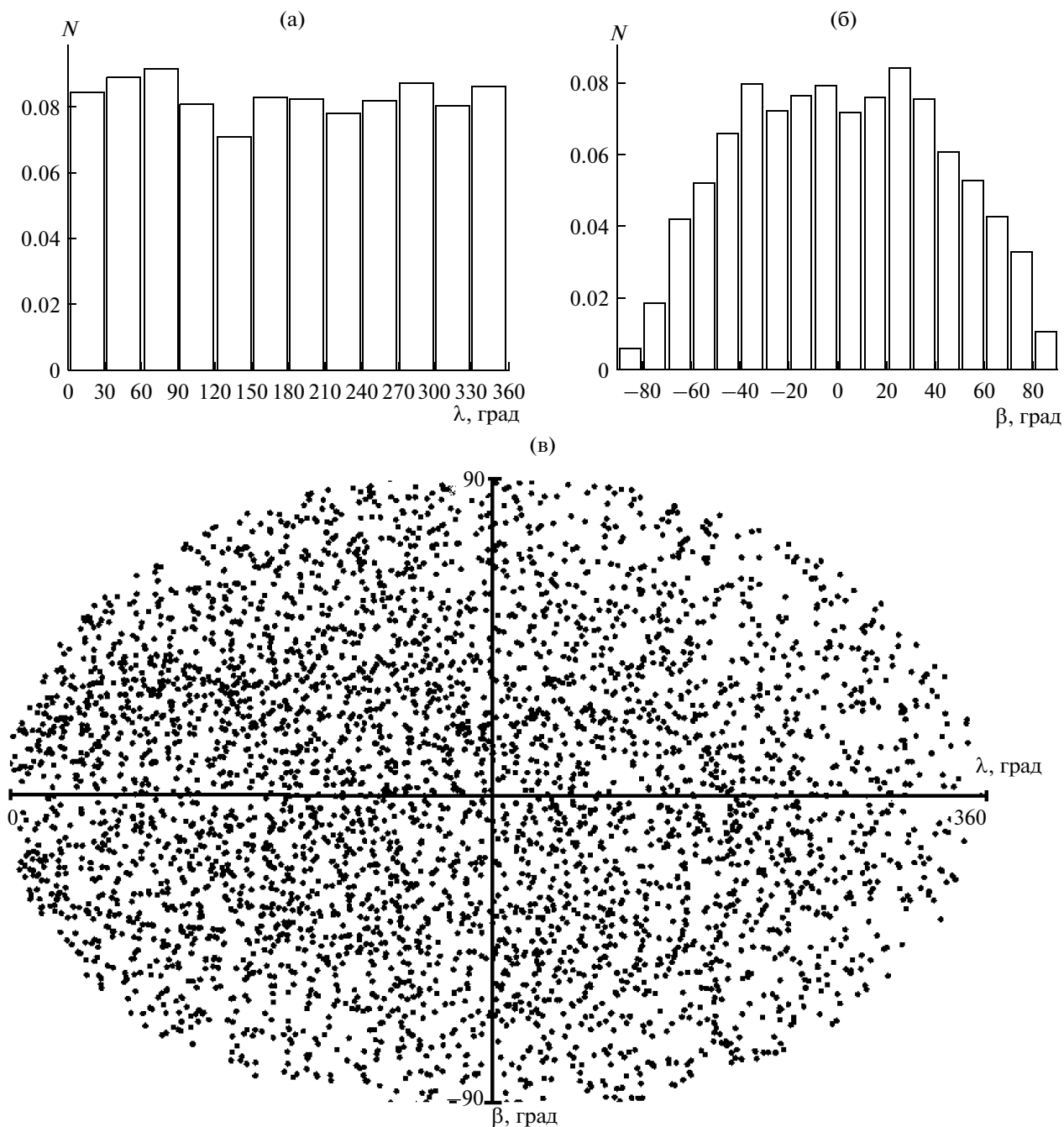
Для исследования характеристик наблюдаемого распределения АСЗ по небесной сфере мы использовали выборку из 1073 объектов (Minor planet center, ноябрь 2012). Мы рассмотрели проекции пространственного распределения АСЗ, точнее картины распределения положений АСЗ в координатах геоцентрической эклиптической широты и долготы в зависимости от объема просматриваемого пространства. Объем задавался размером (радиусом)  $R$  просматриваемой сферы с центром в центре Земли. В данной работе рассмотрены два крайних случая  $R [0; 0.05]$ , т.е. ближняя область, в которой могут появляться ПОО, и большой объем  $R [0, 1]$ , где интервалы значений  $R$  даны в астрономических единицах.

Для более наглядного представления распределения АСЗ мы предположили, что объекты равномерно распределены по средней аномалии и их открытие происходит в случайный момент времени. Поэтому для каждого наблюдаемого объекта было создано 360 варьированных орбит (клонов), которые отличались только значением средней аномалии с шагом 1 градус. Если объект попадал в заявленный интервал  $R$ , то вычислялись его геоцентрические эклиптические координаты (долгота и широта). Такая методика получения пространственного распределения астероидов была использована в статье (Емельяненко и др., 2011).

На рис. 2 показаны распределения относительного числа  $N$  виртуальных объектов (астероидов) по координатам  $\lambda$  или  $\beta$ . Глубина наблюдаемого пространства (радиус сферы с центром в центре Земли) здесь составляет 0.05 а. е. Также показана картина распределения (виртуальных) АСЗ по небесной сфере в проекции Aitoff.

На рис. 3 те же распределения показаны для случая, когда глубина наблюдаемого пространства (радиус сферы с центром в центре Земли) составляет 1 а. е.

Сравнение рис. 2 и 3 иллюстрирует очевидные факты. Распределение наблюдаемых положений АСЗ по долготе можно считать однородным, независимо от глубины просматриваемого пространства. Объяснение небольших вариаций в “долготном” распределении дано в работе (Емельяненко и др., 2011). Распределение же наблюдаемых положений АСЗ по широте сильно зависит от глубины просматриваемого пространства.



**Рис. 2.** Распределения относительного числа виртуальных АСЗ по геоцентрическим эклиптическим координатам: долготе  $\lambda$  (слева вверху) и широте  $\beta$  (справа вверху) для  $R [0; 0.05]$ . На нижней панели показана картина распределения (виртуальных) АСЗ по небесной сфере в проекции Aitoff.

АСЗ в ближней зоне ( $R < 0.05$  а. е., фактически это уже ПОО) могут наблюдаться в любой области небесной сферы с одинаковой вероятностью. При увеличении глубины просматриваемого пространства до 1 а. е. четко проявляется общее свойство распределения орбит астероидов по наклонению  $i$ . Положения астероидов концентрируются к плос-

кости эклиптики. Следовательно, система обнаружения близких ОНТ должна быть рассчитана на необходимость просмотра всей небесной сферы с одинаковой тщательностью, а система обнаружения ОНТ на “дальних подступах” должна быть рассчитана на более частый просмотр областей близ эклиптики.

### НА КАКОМ МИНИМАЛЬНОМ РАССТОЯНИИ ОТ ЗЕМЛИ НЕОБХОДИМО ОБНАРУЖИВАТЬ ОПАСНЫЕ НЕБЕСНЫЕ ТЕЛА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТАТОЧНОГО ВРЕМЕНИ УПРЕЖДЕНИЯ?

Понятно, что крупные ОНТ обнаружить легче. Однако задача массового обнаружения ставится прежде всего для наиболее многочисленных ОНТ малого размера (от 50 м). Обнаружение таких объектов на большом расстоянии – очень трудная техническая задача, поскольку требуется создание крупноапертурных широкоугольных инструментов, стоимость создания которых весьма высока, если вообще возможно построить такую систему для заданного сочетания размера апертуры и поля зрения. Здесь важен компромисс: нужно обнаружить ОНТ на таком расстоянии, чтобы успеть среагировать на угрозу (столкновения с ним) и в то же время не тратить чрезмерные средства для построения системы обнаружения на очень больших расстояниях. В дальнейшем анализе скоростей сближения мы рассматриваем только потенциально опасные объекты (ПОО), определение которых дано во Введении.

Расстояние  $D$  обнаруженного опасного небесного тела от Земли связано в первом приближении со скоростью  $V$  движения тела простым соотношением

$$t_{\text{п}} = D/V,$$

где  $t_{\text{п}}$  – так называемое подлетное время, а скорость  $V$  определяется как скорость сближения с орбитой Земли на межорбитальном расстоянии 0.05 а. е.

На практике необходимо иметь необходимое время для принятия соответствующих мер противодействия. Такое время, время упреждения  $t_{\text{у}}$ , конечно, определяется техническими возможностями существующих средств противодействия. В любом случае главное требование, предъявляемое к любой системе обнаружения опасных тел,

$$t_{\text{п}} \geq t_{\text{у}}.$$

В дальнейшем мы будем рассматривать наиболее “жесткую” ситуацию  $t_{\text{п}} = t_{\text{у}}$ . Типичная современная оценка времени упреждения – 30 суток (см., например, Report of the Task Force..., 2008).

Нужно также иметь некоторое время с момента первого наблюдения тела, для того чтобы определить его орбиту с точностью, позволяющей классифицировать тело, например, как потенциально опасное. Как показывает практика определения орбит, для этой предварительной классификации достаточно иметь наблюдения тела на дуге в несколько градусов. Для проведения наблюдений требуется некоторое время  $\Delta t_{\text{н}}$ . Поэтому мы вводим следующее требование к системе обнаружения: первое наблюдение малого тела

должно быть проведено не позднее чем за  $t_{\text{н}}$  дней до сближения, где

$$t_{\text{н}} = t_{\text{у}} + \Delta t_{\text{н}},$$

а расстояние  $D_{\text{н}}$ , на котором нужно провести первое наблюдение малого небесного тела, определяется как

$$D_{\text{н}} = t_{\text{н}} V = (t_{\text{у}} + \Delta t_{\text{н}}) V.$$

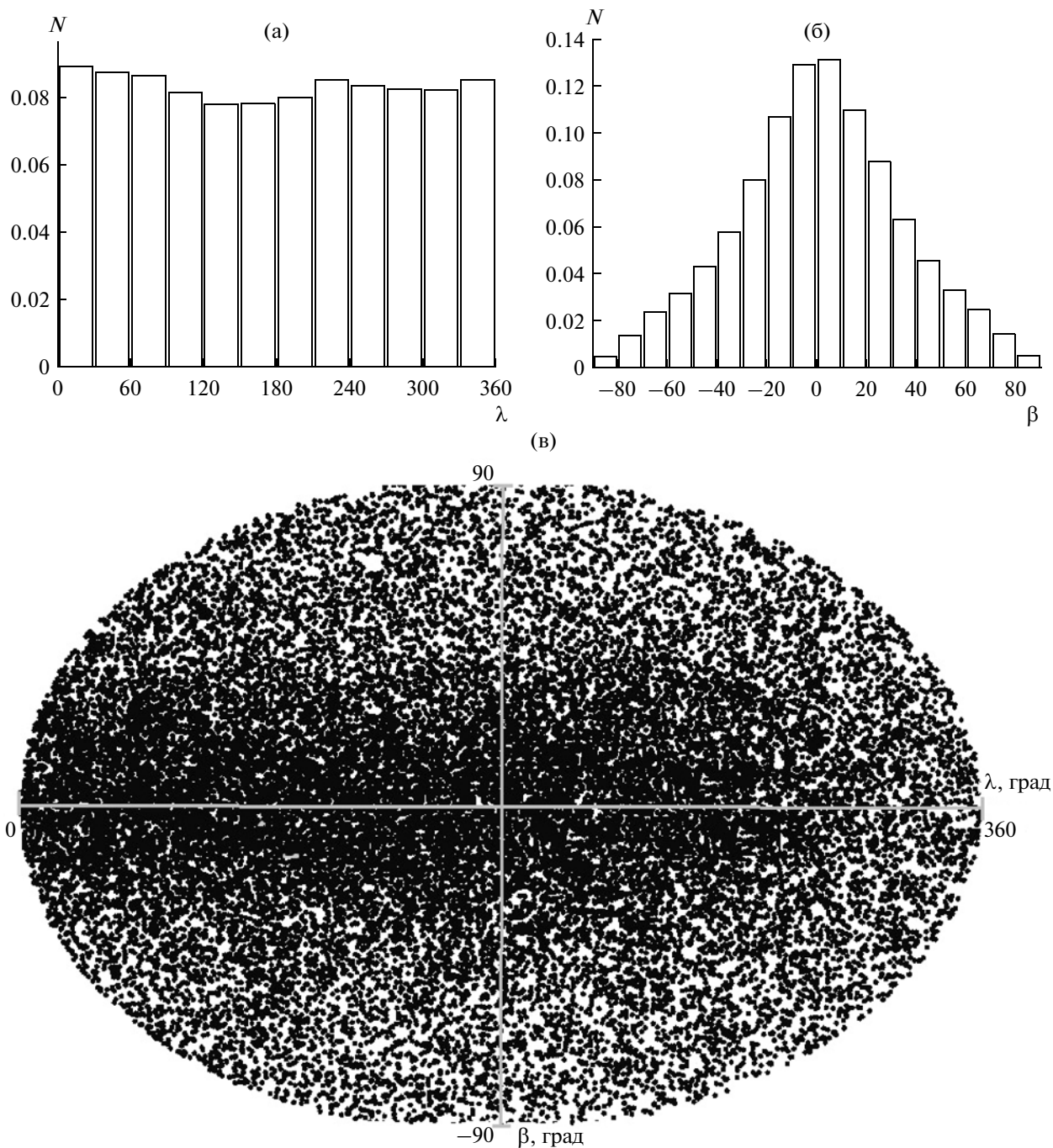
Разумеется, эти оценки приближенные, поскольку за период порядка месяца скорость тела относительно Земли может меняться довольно существенно. Если скорость движения тела определяется в момент его обнаружения, то для очень вытянутых орбит расстояние, проходимое телом за период  $t_{\text{н}}$ , может быть существенно меньше  $D_{\text{н}}$ , если тело приближается из внешних областей Солнечной системы, и, соответственно, больше  $D_{\text{н}}$ , если тело приближается со стороны Солнца. С практической точки зрения нужно определить некоторое значение максимальной скорости сближения  $V_{\text{max}}$  и строить систему обнаружения, задаваясь этим значением. Отметим, что *теоретически* возможное значение  $V_{\text{max}}$  для тел Солнечной системы известно, оно составляет 72 км/с, но из практических соображений целесообразнее строить систему обнаружения, исходя не из этого значения предела скорости сближения, а из реального (более низкого) значения предела. Конечно, гравитационное воздействие Земли должно увеличить скорость сталкивающегося тела, но это приращение не столь значительно, чтобы его можно было учитывать в практическом плане, имея в виду вышеизложенное (см., например, Кривоногов и др., 1998).

Естественно, что звездная величина обнаруживаемого тела данного размера зависит от  $D_{\text{н}}$ , и проникающая сила инструмента обнаружения (телескопа) должна обеспечивать возможность обнаружения тела такой звездной величины, а значит, она определяется расстоянием  $D_{\text{н}}$ . Проникающая сила телескопа определяет его основные конструктивные характеристики и, соответственно, его стоимость.

Этот простой анализ показывает насколько важна правильная оценка скорости сближения для рационального подхода к созданию (системы) обнаружения опасных тел. Понятно, что чем выше скорость сближения, тем больше должно быть расстояние  $D_{\text{н}}$ , и при проектировании системы обнаружения к ней (системе) предъявляются более жесткие требования.

Таким образом, основное соотношение, определяющее исходные требования к системе обнаружения по дальности обнаруживаемого объекта, выглядит так:

$$D_{\text{н}} = (t_{\text{у}} + \Delta t_{\text{н}}) V_{\text{max}}. \quad (3)$$



**Рис. 3.** Распределения относительного числа виртуальных АСЗ по геоцентрическим эклиптическим координатам: долготе  $\lambda$  (слева сверху) и широте  $\beta$  (справа сверху) для  $R [0; 1]$ . На нижней панели показана картина распределения (виртуальных) АСЗ по небесной сфере в проекции Aitoff.

Подробный анализ скоростей сближения околоземных астероидов с орбитой Земли проведен в работе (Нароенков, Шустов, 2012). В этой работе были проанализированы скорости сближения с Землей более 3 тысяч ПОО. Остановимся на основных результатах этой статьи. На рис. 4 показано распределение скоростей сближения 3262 по-

тенциально-опасных астероидов (без ограничения размера) с орбитой Земли (напомним, что скорость сближения определяется в момент, когда расстояние между малым телом и орбитой Земли, составляет 0.05 а. е.).

Как видно из рис. 4, скорости сближения известных потенциально-опасных астероидов с ор-

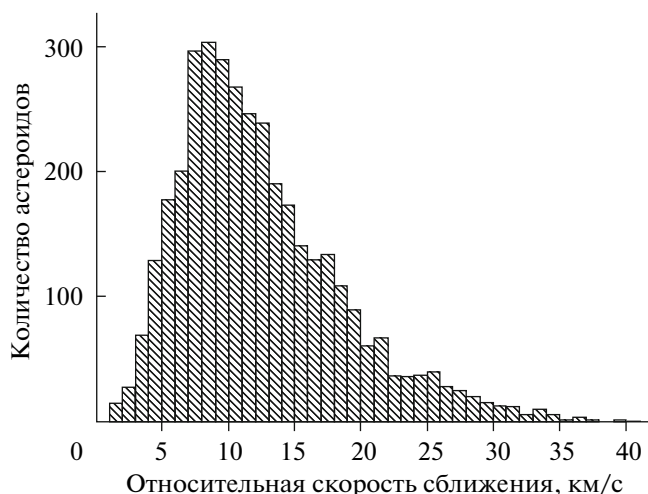


Рис. 4. Распределение скоростей сближения потенциально опасных астероидов с Землей (из работы (Нароенков, Шустов, 2012)).

битой Земли находятся в границах от 1 до 40 км/с. Большая часть астероидов (95%) сближается с орбитой Земли на скоростях до 25 км/с. Отсутствуют сближения на высоких скоростях (более 40 км/с), характерные для объектов с большими значениями большой полуоси и эксцентриситета, например комет. В (Нароенков, Шустов, 2012) также показано, что большая часть комет, сближающихся с Землей, может сближаться с орбитой Земли на скоростях от 10 до 25 км/с. Но есть 4 кометы, у которых относительные скорости сближения превышают 40 км/с. Из них две кометы — SOHO-кометы (C/1999 X3 (SOHO) и P/1999 J6 (SOHO)) имеют относительные скорости от 40 до 45 км/с и 2 кометы — кометы галлеевского типа (109P/Swift–Tuttle и 55P/Tempel–Tuttle) имеют относительные скорости сближения 59 и 70 км/с соответственно. Число таких объектов мало и в качестве заключения о скоростях сближения ОНТ с Землей можно сказать, что среди всех известных потенциально опасных объектов 99.8% объектов сближается с орбитой Земли на скоростях до 40 км/с, и лишь 0.2% — на скоростях более 40 км/с. В принципе, при построении системы обнаружения можно пренебречь этой малой долей ОНТ.

Таким образом, можно принять, что  $V_{\max} = 40$  км/с. Теперь для определения  $D_n$  по формуле (1) нужно определить значение  $\Delta t_n$ . В идеальном случае, когда опасный объект был открыт заблаговременно, например за несколько лет или даже за несколько десятков лет, у астрономов есть время, чтобы точно определить орбиту, выявить опасные участки в плоскости цели — “замочные скважины”, чтобы точно сказать, столкнется тело с планетой или нет. А если времени в запасе нет или есть всего несколько дней или недель, то естественен вопрос — какова минимальная необходимая дли-

на  $\Delta t_n$  дуги наблюдений, чтобы можно было точно рассчитать, на каком расстоянии пролетит объект от Земли и какова вероятность столкновения? В статье (Нароенков и др., 2013) эти вопросы рассмотрены подробно. В указанной работе были поставлены две главные задачи.

- Определить минимальную длину  $\Delta t_n$  дуги, обеспечивающую определение параметров орбиты обнаруженного тела с точностью, достаточной для его классификации. Анализ необходимо выполнить для типов орбит, характерных для ОСЗ, т.е. для орбит астероидного и кометного (с большим эксцентриситетом) типа.

- Выяснить, как наиболее оптимально построить программу наблюдений на дуге  $\Delta t_n$  (учитывая параметры обзоров: количество наблюдений, интервал между наблюдениями и т.д.).

Были рассмотрены три типа орбит. В качестве конкретных примеров были взяты реальные случаи: астероидная орбита с эксцентриситетом 0.57 и большой полуосью 2.13 а. е., сильно-эллиптическая орбита с эксцентриситетом 0.82 и большой полуосью 2.78 а. е. и кометная орбита с эксцентриситетом 0.96 и большой полуосью 26.09 а. е. Одним из условий в численном моделировании было то, что орбита должна быть определена не позднее чем за время  $t_y$  до сближения тела с Землей. Главным параметром задачи является длина дуги  $\Delta t_n$ . Другие параметры — среднеквадратичная ошибка одного наблюдения и характер распределения наблюдений по дуге. Также параметром, но с фиксированным значением, является величина  $t_y$  (было использовано значение 30 сут).

Главные выводы, следующие из анализа результатов проведенного исследования, таковы:

- 1) при наземных наблюдениях (консервативная оценка типичной ошибки позиционных наблюдений с наземным инструментом  $\sigma_n = 0.5''$ ) длина дуги  $\Delta t_n$  наблюдений, достаточная для классификации малого тела Солнечной системы с орбитой астероидного типа как угрожающего (по критерию (1)), составляет 4 сут при разумных параметрах программы наблюдений;

- 2) применение систем космического базирования, позволяющих обеспечивать более высокую точность наблюдений ( $\sigma_n = 0.1''$ ), существенно увеличивает точность прогноза. Для орбит астероидного типа при длине дуги наблюдений более 2 дней возможно уверенное выделение угрожающих тел, а при длине дуги более 7 суток уже возможно выделить (по критерию (2)) столкновительные тела;

- 3) для орбит кометного типа трудно определить по короткой дуге (<7 дней), является ли такое тело угрожающим или нет. Для классификации такого тела как угрожающего необходимо наблюдать тело 12 дней и более при ошибке

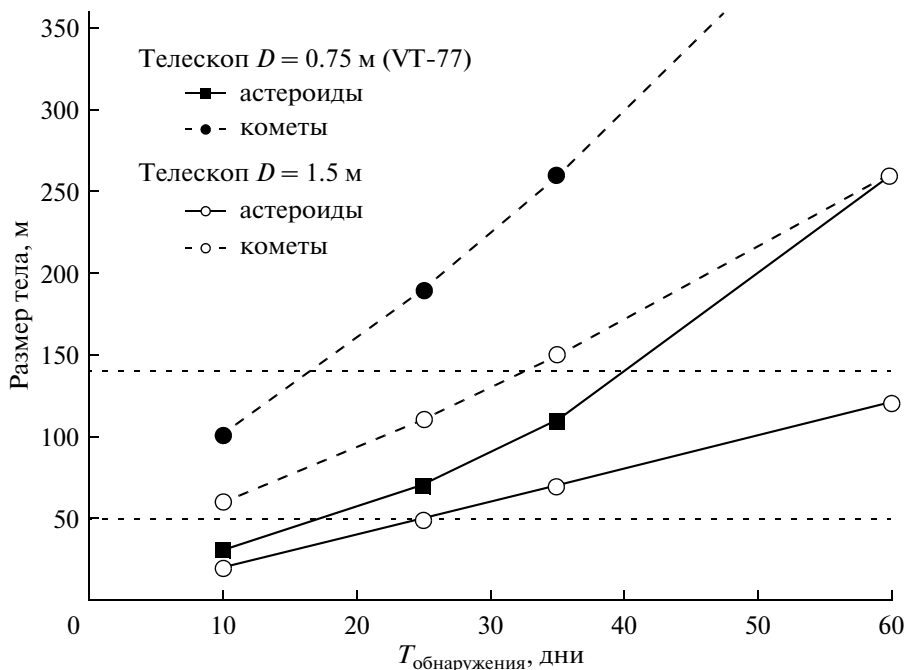


Рис. 5. Зависимость “размер ОНТ–время обнаружения” для телескопа VT-77 (0.75 м) и телескопа с зеркалом 1.5 м.

наблюдений 0.5", а при ошибке наблюдений 0.1" – 7 дней и более.

Эти выводы могут и должны быть положены в качестве основных исходных данных при проектировании рациональной системы (инструментов) для массового обнаружения опасных небесных тел.

### ПРИМЕР ПРОЕКТА СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ОНТ, ПОСТРОЕННОЙ НА РАССМОТРЕННЫХ В ДАННОЙ РАБОТЕ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЯХ И ОГРАНИЧЕНИЯХ

Полученные выше рекомендации (ограничения) имеют общий характер. Они были использованы на примере проекта конкретной системы космического базирования, предназначенной для обнаружения ОНТ в видимом диапазоне. В работе (Шугаров и др., 2013) представлена концепция космической системы обнаружения опасных небесных тел размером свыше 50–100 м за 15–30 дней до их возможного столкновения с Землей на базе широкоугольного телескопа VT-77 с апертурой 0.75 м и полем зрения диаметром 7°. Предложена предварительная компоновка космического аппарата с использованием платформы среднего класса НПО им. С.А. Лавочкина. Даны предварительные оценки основных параметров системы. Основное достоинство системы – сочетание высокой производительности, проникающей силы, умеренной технической сложности и стоимости реализации.

По результатам моделирования, учитывающего все важные астрономические и технические факторы: условия освещенности объекта, влияние смаза изображения ОНТ на детекторе и т.д., определена зависимость размер ОНТ – время от обнаружения до сближения тела с Землей (рис. 5). На рисунке показаны такие зависимости в случае использования телескопа VT-77 и, для сравнения, телескопа с диаметром главного зеркала 1.5 м с масштабом 0.5 угл. с/пиксел (проект “Небосвод”). При расчетах использовался критерий массовости обнаружения (>70%) ОНТ.

Результаты расчетов показывают, что для телескопа VT-77 время обнаружения для большей части астероидов размером 100 м и комет размером 250 м составляет около 35 дней до их возможного столкновения с Землей. Время обзора для системы с телескопами VT-77 составляет 3/6 дней при использовании двух/одного телескопов. В обоих случаях время упреждения составляет около 30 дней. Для обнаружения небольших (от 50 м) ОНТ при таком времени упреждения нужен телескоп с большей апертурой.

### ВЫВОДЫ

Проблема АКО, будучи проблемой, изучаемой фундаментальной наукой, в последние годы также приобрела выраженный практический характер. Для требуемого (в практическом плане) построения системы принятия решений мы предлагаем следующее.



- Изменить определение потенциально опасного объекта в смысле изменения нижней границы размеров тела со 140 до 50 м.

- В дополнение к устоявшимся определениям объектов, сближающихся с Землей (ОСЗ), и потенциально опасных объектов предлагается называть тело (и, соответственно, его орбиту) **угрожающими**, если, с одной стороны, оценка его наименьшего расстояния  $D$  до центра Земли не превышает радиуса  $L_D$  лунной орбиты, а с другой, — зона рассеяния орбит, размер которой (радиус) определяется как  $3\sigma_D$  ( $\sigma_D$  — среднеквадратичная ошибка определения величины  $D$ ), как минимум касается планеты Земля ( $R_E$  — радиус Земли), т.е.  $D < L_D$  и  $(D - 3\sigma_D) < R_E$ , и **столкновительными**, если выполняются условия  $D < R_E$  и  $3\sigma_D < R_E$ .

Получены основные астрономические ограничения, характеризующие задачу массового обнаружения опасных небесных тел. В практическом плане имеют значение следующие результаты.

В ближней зоне (до расстояний 0.05 а. е.) распределение ОНТ по небесной сфере равномерное. Поэтому системы обнаружения относительно малых объектов, таких, например, как Челябинский метеороид, должны быть настроены на обзор всей небесной сферы без выделения отдельных зон. Это означает, например, что могут быть эффективны обзорные системы с пассивным сканированием.

В дальней зоне (до 1 а. е.) ОНТ концентрируются к плоскости эклиптики, так что эти зоны должны наблюдаться чаще.

Скорость сближения (с Землей) подавляющего большинства ОНТ не превышает 40 км/с. Это означает, что при времени упреждения 30 дней расстояние, на котором необходимо обнаружить тело, составляет не менее 1 а. е.

Для тел размером 50 м это означает, что проникающая сила телескопа в видимом диапазоне должна быть не хуже  $23^m$ .

Для построения орбиты небесного тела с точностью, достаточной для классификации тела (орбиты) как опасного (в смысле ПОО, а в отдельных случаях — как угрожающего или столкновительного), необходимы наблюдения на длине ду-

ги не менее нескольких дней при высокой точности наблюдений. Этот вывод сильно зависит от эксцентриситета орбиты.

Эти выводы могут и должны быть положены в качестве основных исходных данных при проектировании рациональной системы или инструментов для массового обнаружения опасных небесных тел. В работе приведен пример такого проекта.

Данная работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы и Программы 22 Президиума РАН “Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Емельяненко В.В., Нароенков С.А., Шустов Б.М.* Распределение околоземных объектов // Астрон. вестн. 2011. Т. 45. № 6. С. 512–517. (*Emel'yanenko V.V., Naroenkov S.A., Shustov B.M.* Distribution of the Near-Earth objects // Sol. Syst. Res. 2011. V. 45. № 6. P. 498–503.)
- Кривоногов А.В., Мельников А.В., Холшевников К.В.* Функция распределения скоростей метеороидов // Вестн. СПбГУ. 1998. Вып. 3. С. 142–145.
- Нароенков С.А., Шустов Б.М.* Распределение скоростей потенциально опасных объектов // Космич. исслед. 2012. Т. 50. № 3. С. 229–233.
- Нароенков С.А., Шустов Б.М., Емельяненко В.В.* О длине дуги наблюдений малого тела Солнечной системы, достаточной для классификации его как опасного // Космич. исслед. 2013, в печати.
- Шугаров А.С., Шустов Б.М., Мартынов М.Б. и др.* О концепции экономичной космической системы обнаружения опасных небесных тел // Космич. исслед. 2013, в печати.
- Шустов Б.М., Рыхлова Л.В., Кулешов Ю.П. и др.* Концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты // Астрон. вестн. 2013. Т. 47. № 4. С. 327–340.
- Committee to review near-Earth object surveys and hazard mitigation strategies. *Defending planet Earth: Near-Earth object surveys.* The National Academies Press, 2010. 152 p.
- Report of the Task Force on potentially hazardous Near Earth Objects. British National Space Center, 2008.