

УДК 523

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ ДЛЯ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

© 2013 г. А. С. Шугаров

Институт Астрономии РАН

Поступила в редакцию 01.04.2013 г.

Представлены результаты моделирования зон видимости потенциально опасных небесных тел для орбитального широкоугольного телескопа с учетом основных параметров детектора, телескопа, движения небесных тел. Проведены расчеты зон видимости опасных небесных тел размером 50–300 м за 7–60 дней до их возможного столкновения с Землей при использовании телескопов с апертурами 0.4, 0.75 (VT-77) и 1.5 м.

DOI: 10.7868/S0320930X13040208

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы во многих странах начаты работы по созданию систем обнаружения и слежения за опасными небесными телами (ОНТ) размером 100 м и более. Столкновение таких тел с Землей влечет за собой катастрофические последствия (Defending Planet Earth..., 2010; Астероидно-кометная опасность, 2010).

Одним из наиболее эффективных методов обнаружения ОНТ считаются внеатмосферные специализированные широкопольные телескопы. Основное преимущество космических систем — возможность проводить наблюдения в гораздо большей области неба, в том числе внутри орбиты Земли, за исключением направления на Солнце, меньший фон неба, возможность круглосуточной работы (Shugarov и др., 2011).

Спутники NEOSSAT и WISE являются первыми широко известными специализированными космическими проектами, предназначенными для проведения обзоров небесной сферы. Диапазон предложений по новым проектам широк — от небольших инструментов, аналогичных упомянутым выше, до крупных (2 м) космических телескопов.

Настоящая работа посвящена описанию результатов моделирования зон видимости ОНТ для космического телескопа видимого диапазона. Результаты моделирования дают возможность определить способность телескопа обнаруживать ОНТ определенного размера за определенное количество дней до их возможного столкновения с Землей, оптимизировать параметры системы, программу наблюдений.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для определения зоны видимости ОНТ для космического телескопа необходимо определить соотношение С/Ш (сигнал к шуму) для ОНТ, летящих с разных направлений и с разной скоростью, учитывая следующие параметры:

- размер ОНТ, фазовый угол, расстояние до Солнца и наблюдателя;
- основные характеристики телескопа и детектора;
- фоновая засветка: зодиакальный свет, рассеянный свет;
- смаз изображения из-за движения ОНТ и телескопа.

Визуальная звездная величина ОНТ определяется по формуле (Bowell и др., 1989):

$$V = H + 5 \lg_{10}(R\Delta) - 2.5 \lg_{10}((1 - G)\Phi_1(\varphi) + G\Phi_2(\varphi)), \quad (1)$$

$$\Phi_1(\varphi) = \exp\left(-3.33 \left(\lg \frac{\varphi}{2}\right)^{0.63}\right), \quad (2)$$

$$\Phi_2(\varphi) = \exp\left(-1.87 \left(\lg \frac{\varphi}{2}\right)^{1.22}\right), \quad (3)$$

где R и Δ — расстояние от Солнца и наблюдателя в а. е.; φ — угол “наблюдатель—ОНТ—Солнце”; G — параметр изменения фазы, среднее значение $G = 0.15$; H — абсолютная звездная величина ОНТ.

Абсолютная звездная величина ОНТ определяется по формуле (Harris, 1997):

$$H = 15.618 - 5 \lg_{10} D - 2.5 \lg_{10} p_v, \quad (4)$$

где D — диаметр ОНТ в километрах, p_v — визуальное геометрическое альbedo (среднее значение 0.15).

Величина зодиакального света в оптическом диапазоне

Угол от Солнца, град	Зодиакальный свет, зв. вел. с кв. с	
	В плоскости эклиптики	Перпендикулярно плоскости эклиптики
30	20.5	20.5
60	21.3	23.2
100	22.8	24
140	23.1	23
160	23	22.8
180	22.8	22.8

Количество зарегистрированных квантов света от ОНТ N_{neo} определяется по формуле:

$$N_{neo} = 10^3 \Delta\lambda S Q_{telescope} Q_{detector} T_{exp} \times 2.512^{-m}, \quad (5)$$

где $\Delta\lambda$ – ширина спектральной полосы, Å; S – незранированная площадь зеркала телескопа, см²; $Q_{telescope}$ – коэффициент пропускания оптической системы телескопа; $Q_{detector}$ – квантовая эффективность детектора; T_{exp} – время экспозиции, с; m – звездная величина ОНТ.

Соотношение сигнала к шуму (С/Ш) вычисляется по формуле:

$$T_{SNR} = \frac{N_{neo}}{\sqrt{N_{neo} + N_{pix} (N_{bg} + N_{dark} + R_{noise}^2)}}, \quad (6)$$

где N_{pix} – количество пикселей, на которые проектируется изображение с учетом смаза; N_{dark} – количество фотонов от фона неба; R_{noise} – шум считывания детектора.

Одним из важных факторов, ограничивающих чувствительность телескопа, особенно для близких ОНТ, является смаз изображения за время экспозиции из-за движения телескопа и ОНТ.

Величина смаза может быть рассчитана для трех случаев:

- Отсутствие смаза позволяет оценить потенциальную зону обнаружения ОНТ при условии гидирования в нужном направлении. Ввиду того, что направления движения ОНТ достаточно произвольные, данный случай представляет малый практический смысл.

- Смаз вычисляется на основе статистики видимых скоростей достаточно полной популяции известных крупных ОНТ ($H < 18$, километровые и более размеры) как функция расстояния до Земли. Предполагается, что стабилизация космического телескопа осуществляется по неподвижным звездам поля. В данном случае проводится оценка способности телескопа обнаруживать основную массу ОНТ при предположении отсут-

ствия зависимости распределения орбит и скоростей от размера ОНТ.

- При вычислении смаза считается, что все ОНТ движутся в точку столкновения с Землей по прямолинейным траекториям с заданной скоростью. Предполагается, что стабилизация космического телескопа осуществляется по неподвижным звездам поля. В данном случае проводится оценка способности телескопа обнаруживать ранее неизвестные столкновительные ОНТ непосредственно перед столкновением.

Еще одним из существенных факторов, ограничивающих чувствительность космического телескопа, является зодиакальный свет. Величины зодиакального света в оптическом диапазоне (Jelinsky, 2004; Poole, 2005) приведены в таблице. Общий фон неба брался на 0.5 зв. вел. ярче величины зодиакального света для учета рассеяния в оптическом тракте телескопа. В области галактического экватора будет дополнительный фон, который не учитывается в настоящей работе.

На достаточно больших расстояниях от Земли (около 1 а. е.) видимое положение большей части ОНТ находится вблизи эклиптики, поэтому для определения зоны видимости можно ограничиться моделированием в плоскости эклиптики. Зона видимости в перпендикулярной к эклиптике плоскости немного больше из-за меньшего фона зодиакального света.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Пробные расчеты проводились для широкоугольного телескопа VT-77, рассчитанного В.Ю. Теребижем. Телескоп имеет апертуру 0.75 м, поле зрения 7°, масштаб пикселя 0.89". В качестве детектора предполагается использовать современные ПЗС-детекторы с обратной засветкой с квантовым выходом 90% и шумом считывания 4 е СКО, временем экспозиции 60 с.

Пример результатов расчета зон видимости ОНТ представлен в графическом виде на рис. 1 и 2. С помощью изофот показаны области равного соотношения С/Ш с шагом 3 единицы при наблюдении ОНТ, отдельной изофотой показан С/Ш = 9, что соответствует уверенному обнаружению ОНТ.

ОНТ можно разделить на тела с кометными и астероидными орбитами. Астероиды преимущественно вращаются вокруг Солнца в одном направлении с Землей, а кометы в первом приближении имеют изотропное распределение скоростей.

Максимальная скорость соударения Земли с телами Солнечной системы может достигать 72 км/с, однако как показано в (Нароенков, Шустов, 2012; Ельяненко и др., 2011), количество таких тел крайне мало. Типовая скорость сближения с астероидами составляет 10–20 км/с.

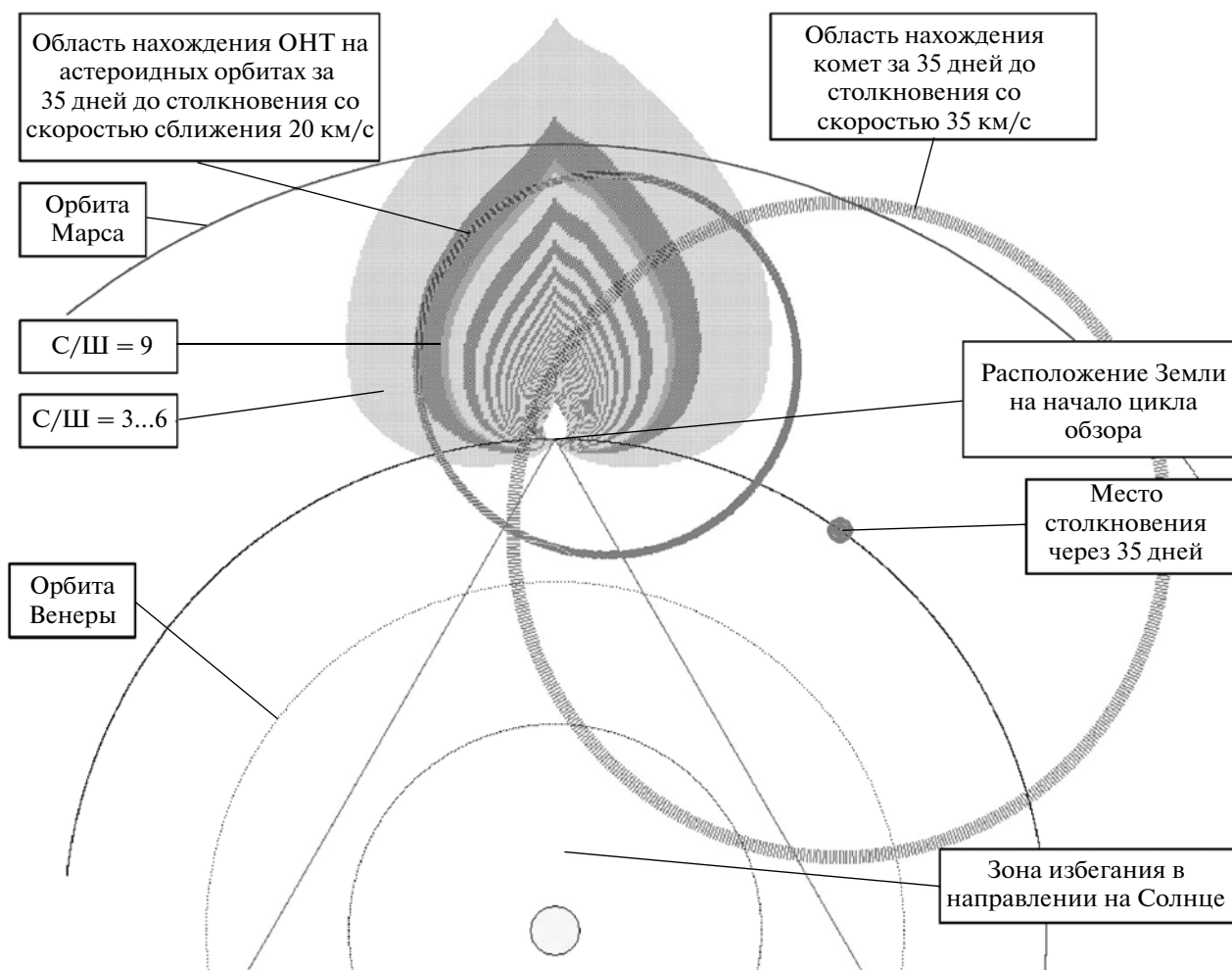


Рис. 1. Зона обнаружения ОНТ размером 100 м для космического телескопа VT-77 и области их нахождения с астероидными и кометными орбитами за 35 дней до столкновения с Землей.

На рис. 1 и 2 окружностями обозначены зоны возможного нахождения астероидов с относительными скоростями столкновения с Землей 20 км/с и комет с гелиоцентрическими скоростями 35 км/с за 35 дней до возможного столкновения с Землей в предположении прямолинейного движения ОНТ в точку соударения. Объединение указанных зон дает область пространства, которая должна просматриваться системой обнаружения ОНТ.

Анализируя результаты моделирования для телескопа VT-77 при заданных параметрах, можно сделать вывод, что телескоп будет способен обнаружить большую часть 100 м ОНТ на астероидных орбитах и практически не сможет обнаружить кометы.

На рис. 2 приведен пример результата расчета зон видимости для ОНТ размером 300 м. В данном случае телескоп VT-77 обеспечивает гарантированное обнаружение всех ОНТ за 35 дней до

возможного столкновения с Землей с астероидными орбитами и большую часть комет.

Стоит особо выделить зону обнаружения ОНТ вблизи Солнца между орбитами Венеры и Меркурия. ОНТ в данной зоне, несмотря на максимальный уровень зодиакального света, достаточно хорошо видны из-за близкого расположения к Солнцу и приемлемого фазового угла. Расчеты показывают, что в данной зоне ОНТ могут быть обнаружены на расстоянии в 1 а. е. и более. Данная область абсолютно недоступна при наблюдениях с Земли и поэтому плохо изучена. Также следует отметить, что обнаружения ОНТ в данной области становится возможным только начиная с их некоторого размера, когда блеск ОНТ позволяет детектировать в этой области над фоном неба.

Для обнаружения ОНТ на малых расстояниях (за неделю до столкновения с Землей) может оказаться более эффективным использование телескопов с меньшей апертурой, но большим полем

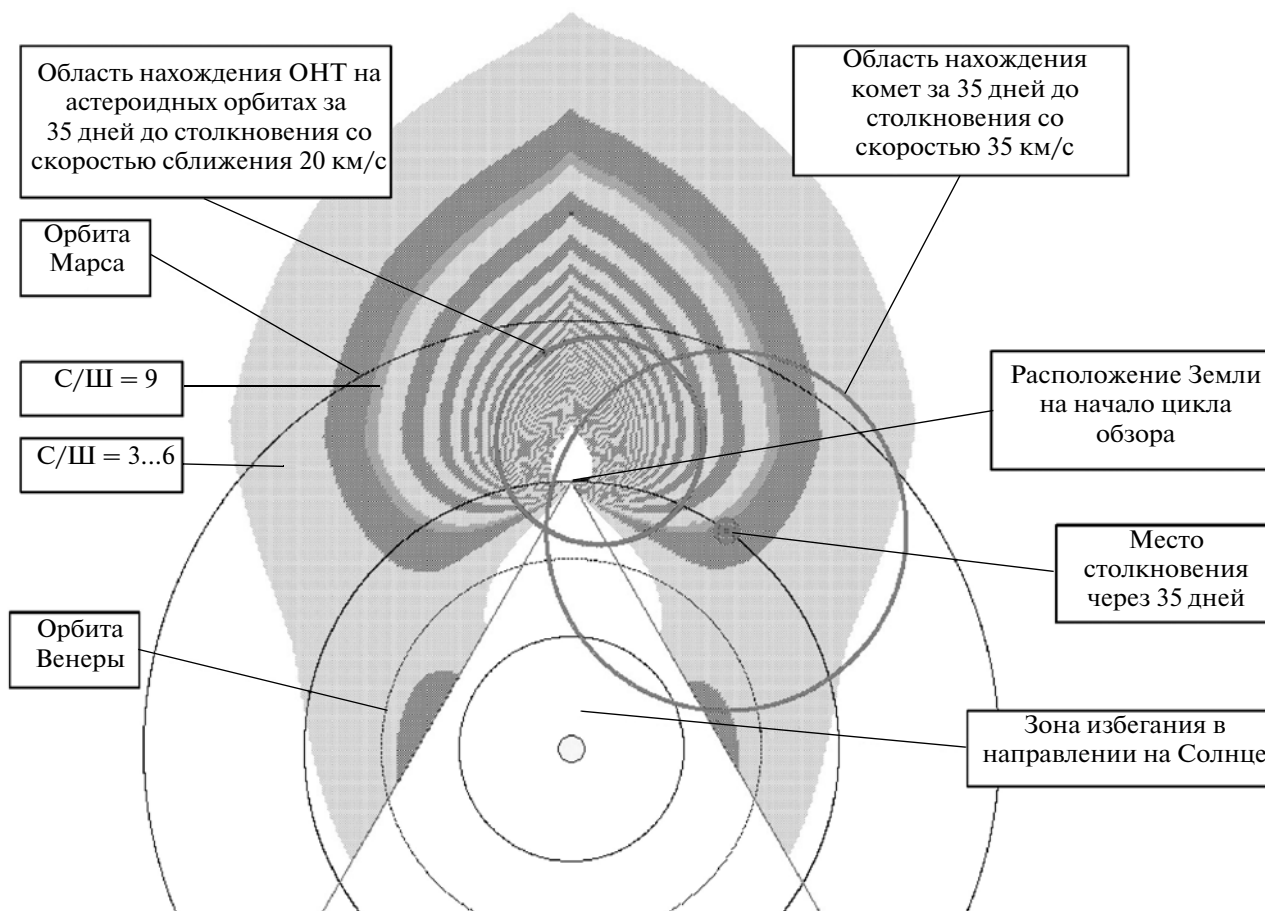


Рис. 2. Зона обнаружения ОНТ размером 300 м для космического телескопа VLT-77 и области их нахождения с астероидными и кометными орбитами за 35 дней до столкновения с Землей.

зрения и, следовательно, производительностью. Например, два телескопа с апертурой 40 см и полем зрения 10° могут проводить обзор всей доступной небесной сферы несколько раз в сутки. Это позволит обнаружить ОНТ малого размера и определить их орбиту за два дня, при этом останется несколько дней на реализацию программы по уменьшению ущерба. На рис. 3 приведена зона видимости ОНТ размером 50 м за 7 дней до столкновения с Землей для телескопа с апертурой 40 см и масштабом изображения 4 угл. с на пиксель.

Зона нахождения ОНТ, угрожающих Земле, имеет несимметричный вид. Для оптимальной работы обзорного телескопа необходимо согласование зоны видимости ОНТ с областью их нахождения. Оптимизация зоны видимости может осуществляться изменением величины экспозиции по разным направлениям:

- минимальная экспозиция в области, противоположной движению Земли;
- максимальная экспозиция в области по направлению движения Земли;

- увеличенная экспозиция вблизи Солнца из-за роста зодиакального света.

Результаты расчетов показывают (рис. 1 и 3), что мелкие ОНТ, находящиеся внутри орбиты Земли, практически не могут быть обнаружены даже с помощью достаточно крупного космического телескопа, расположенного на околоземной орбите из-за малого фазового угла и роста зодиакального фона неба вблизи Солнца. Для обнаружения этих тел необходимо размещение телескопа на большом удалении от Земли, например на венерианской орбите.

На рис. 4 приведена зависимость “размер ОНТ—время обнаружения” для телескопа VLT-77 и телескопа с диаметром главного зеркала 1.5 м с масштабом 0.5 угл. с на пиксель. При расчетах использовался критерий обнаружения около 70% ОНТ. Основываясь на результатах моделирования зон видимости, возможно провести исследования с целью подбора оптимальных параметров телескопа, таких как поле зрения, масштаб изображения, параметры ПЗС-детектора, времени экспозиции.

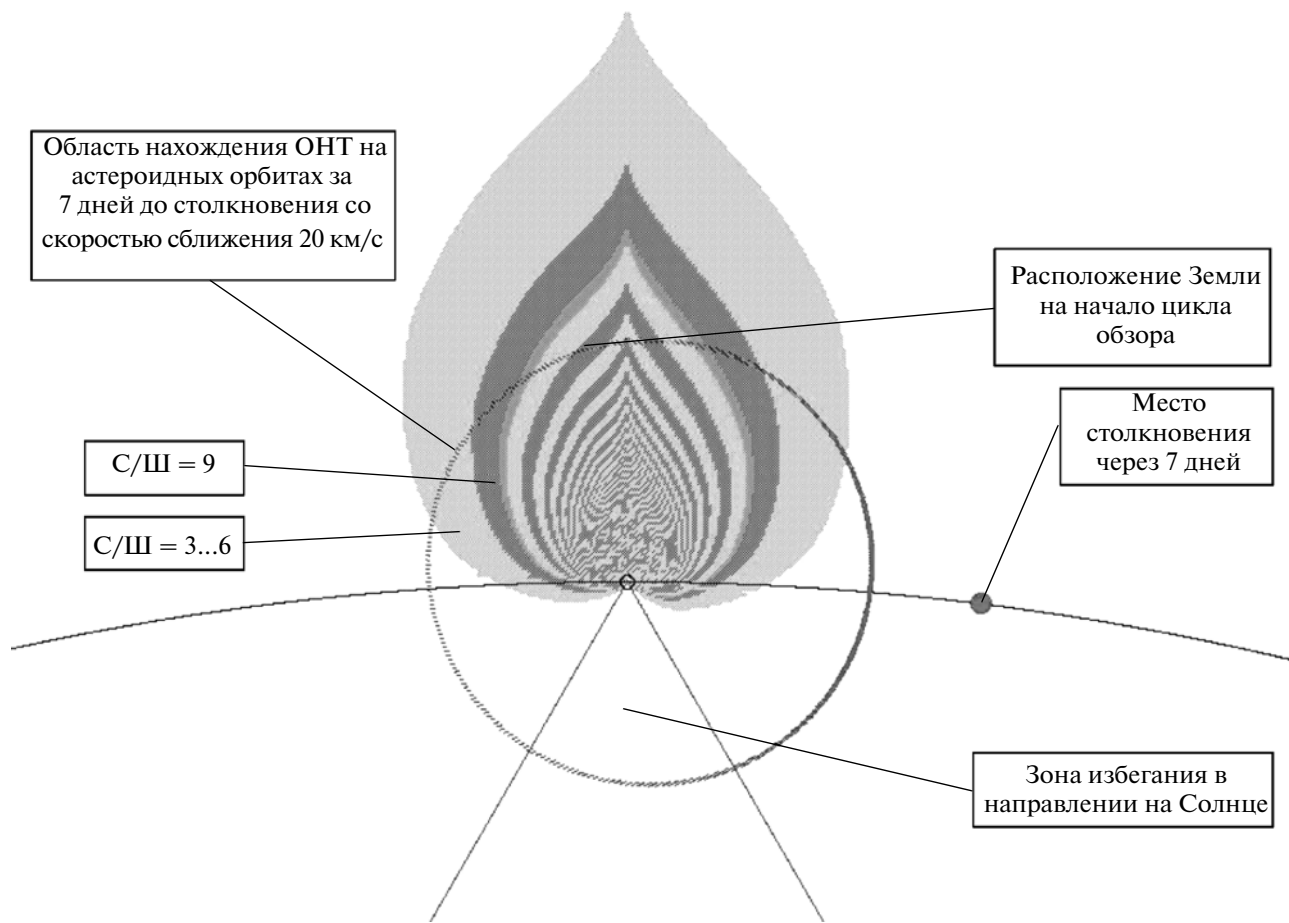


Рис. 3. Зона обнаружения ОНТ размером 50 м для космического телескопа с апертурой 40 см и области их нахождения с астероидными орбитами за 7 дней до столкновения с Землей.

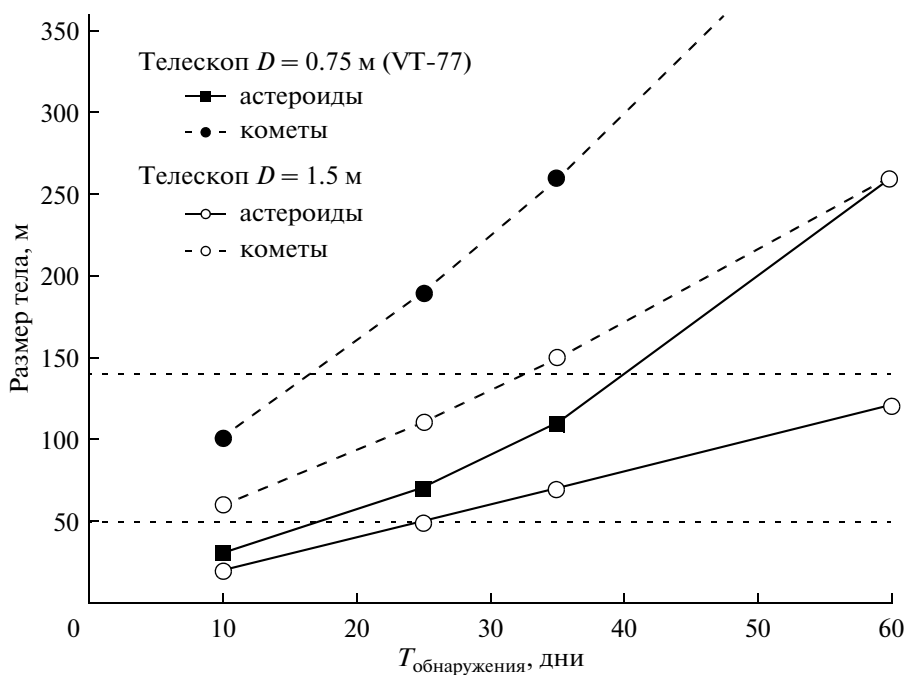


Рис. 4. Зависимость “размер ОНТ–время обнаружения” для телескопа VT-77 (0.75 м) и телескопа с апертурой 1.5 м.

ВЫВОДЫ

Проведено моделирование зон видимости ОНТ с целью определения способности различных космических телескопов наблюдать космические тела заданного размера за определенное число дней до их возможного столкновения с Землей. Разработанная программа моделирования может быть использована при проектировании космических систем обнаружения ОНТ для оптимизации параметров телескопа и детектора, определения времени экспозиции, зон обзора.

В качестве примера проведен расчет для широкоугольного телескопа VT-77, который показывает его пригодность для обнаружения ОНТ с типичными скоростями на астероидных орбитах размером вплоть до 100 м за 35 дней до их возможного столкновения с Землей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астероидно-кометная опасность / Ред. Шустов Б.М., Рыхлова Л.В. Москва: Физматлит, 2010. 384 с.
- Емельяненко В.В., Нароенков С.А., Шустов Б.М. Распределение околоземных объектов // Астрон. вестн. 2011. Т. 45. 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.)
- Нароенков С.А., Шустов Б.М. Распределение скоростей потенциально опасных объектов // Космич. исслед. 2012. Т. 50. С. 229–233.
- Bowell E., Hapke B., Domingue D., et al. Application of Photometric Models to Asteroids (Appendix: The IAU Two-Parameter Magnitude System for Asteroids) // Asteroids II / Eds. Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M. Univ. Arizona Press, 1989. P. 549–556.
- “Defending Planet Earth: Near-Earth Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies: Final Report.” Committee to Review Near-Earth Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies Space Studies Board; National Research Council, 2010.
- Harris A.W., Harris A.W. On the revision of radiometric albedos and diameters of asteroids // *Icarus.* 1997. V. 126. P. 450–454.
- Jelinsky P. Scatter Sources for SNAP. Technical report. 2004.
- Poole T.S. Sky Background Calculations for the Optical Monitor (Version 6). Technical report. 2005.
- Shugarov A.S., Terebizh V.Yu., Martynov M.B., et al. A Concept of Space System Designed for the Detection of NEOs // Proc. 2011 IAA Planetary Defense Conference. 2011.