О МИГРАЦИИ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И ОБНАРУЖЕНИИ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ, ВКЛЮЧАЯ ФРАГМЕНТЫ “КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА”

А. В. Багров[1], Е. С. Баканас[1], С. И. Барабанов[1], Г. Т. Болгова[1], А. М. Микиша[1], Л. В. Рыхлова[1], В. К. Тарадий[2], А. В. Сергеев[2]

[1] *Институт астрономии РАН, Москва, Россия*
e-mail: baraban@inasan.rssi.ru

[2] *Международный центр астрономических и медико-экологических исследований*
e-mail: terskol@burbonz.nalnet.ru

В настоящее время вырос интерес к малым телам Солнечной системы. Это обусловлено двумя основными причинами. Первая – активно обсуждаемая проблема астероидно-кометно-метеороидной опасности вообще и для земной цивилизации в частности. В связи с этим основными задачами при изучении Солнечной системы являются понимание эволюции и путей миграции малых тел. Вторая причина – это качественно новый уровень наблюдательной техники в астрономии например ПЗС-камеры. Был проведен поиск тел метрового и декаметрового диапазона в болидных и метеорных потоках. Количественная оценка потенциально опасных тел в потоках для Земли была сделана на основе совместного исследования метеорных и болидных потоков. Наблюдения вблизи радианта метеорных и болидных потоков позволяют детектировать потенциально опасные объекты метрового и декаметрового размера. Рассматривается возможность существования тел в окрестностях точек либрации Сатурна. Проведены поисковые наблюдения объектов в этих областях. Представлены используемая техника наблюдений и полученные предварительные результаты.

ABOUT MIGRATION OF SMALL SOLAR SYSTEM BODIES AND DETECTION OF POTENTIALLY HAZARDOUS OBJECTS AND SPACE DEBRIS FRAGMENTS, by Rykhlova L. V., Bagrov A. V., Bakanas E. S., Barabanov S. I., Bolgova G. T., Mikisha A. M., Tarady V. K., Sergeev A. V. – Nowadays interest is growing in the population of small bodies in the Solar System. It is caused by two basic reasons. First, the asteroid-comet-meteoroid hazard for space vehicles and, in general, for an Earth’s civilization has been actively discussed recently. The fundamental task of studying the population of small bodies in the Solar System, their evolution and ways of migration is requisite in this respect. Second, new radiation detectors such as CCD-cameras which were introduced in the observation practice make the observations of small bodies possible. The research of fireball and meteor streams of bodies of meter and decameter sizes was carried out. The quantitative estimation of the streams of celestial bodies which are potentially hazardous for the Earth was made on the basis of a complex meteor-fireball research. Observations near the radiants of meteor and fireball streams allow the detection of potentially hazardous objects of meter and decameter size. The possible existence of Saturn-librated asteroids is discussed. The analysis of asteroid population at the triangle libration points of Saturn as well as of previous observational search is presented. The technique used and previous results of observations are presented.

Большая часть известных астероидов имеет орбиты, лежащие между орбитами Марса и Юпитера, в так называемом главном поясе астероидов. В периферийных частях Солнечной системы были известны отдельные астероиды. Некоторые из них, например Хирон, имеют двойственную природу: будучи обнаружен как астероид, он в некоторые периоды проявляет кометную активность – из него происходит истечение газа и пыли. Короткопериодические кометы в афелиях уходят от Солнца существенно дальше орбиты Юпитера. Высказывались предположения о наличии множества объектов за пределами орбиты Юпитера, имеющих природу, сходную с кометами (но не всегда проявляющими себя как кометы). Именно такие объекты считались источником появления новых короткопериодических комет. По оценкам из короткопериодических комет образовалось около половины всех астероидов, сближающихся с Землей.

Популяция малых тел Солнечной системы в окрестностях орбиты Земли непрерывно обновляется, так как срок существования таких тел ограничен примерно 100 млн лет для астероидов и несколькими тысячами лет для комет, а их поток в окрестностях Земли постоянен на протяжении по крайней мере последних 3 млрд лет. На сегодняшний день нет ни одной теории, удовлетворительно описывающей приток всех типов малых тел во внутренние части Солнечной системы. Кроме того, наше знание о ряде типов малых тел, даже в окрестностях Земли, недостаточно и требует проведения специальных наблюдательных программ. Предположение, что резервуаром непрерывного пополнения малых тел во внутренних частях Солнечной системы являются пояса тел за орбитой Юпитера, представляется наиболее перспективным для тщательного исследования.

В мире действует ряд служб, нацеленных на выявление всех астероидов размером свыше 1 км, представляющих потенциальную опасность столкновения с Землей. В результате резко возросло количество открываемых астероидов. Считается, что к 2010 г. все указанные астероиды будут открыты. Вопрос о полноте выборки для тел диаметром менее 1 км пока не ставится.

ИНАСАН является инициатором и пока единственным с мире исследователем метеороидов в процессе их прохождения через околоземное космическое пространство. Это позволяет включить в число исследуемых малых тел, представляющих потенциальную опасность для Земли, тела меньших, по сравнению с астероидами, размеров и тем самым использовать накопленные в мире данные по болидной и метеорной астрономии. Такой подход за счет резкого увеличения количества рассматриваемых объектов позволяет на качественно более высоком, чем в мировой практике, уровне проводить исследование популяции малых тел, представляющих опасность столкновения с Землей и миграции таких тел из периферии Солнечной системы.

Исследование мигрирующих тел Солнечной системы является важнейшей задачей современной фундаментальной науки, без решения которой невозможно будет воссоздать историю нашей планетной системы и разобраться в вопросе происхождения жизни на Земле. Вплоть до конца XX века ученые всего мира пытались путем построения математических моделей и их обоснования на скудном наблюдательном материале создать космогоническую теорию, которая смогла бы ясно и аргументированно объяснить твердо установленные характеристики Солнечной системы. Задача эта оказалась настолько трудной, что она до сих пор не решена даже на качественном уровне, несмотря на успехи космонавтики в изучении космических тел. Здесь уместно подчеркнуть, что хотя основная масса вещества Солнечной системы сосредоточена в самом Солнце и больших планетах, находящихся на почти круговых орбитах, огромное количество малых тел (размером от долей миллиметра до нескольких километров) находится на эллиптических орбитах, которые существенно изменяются на характерном интервале несколько тысяч лет под действием больших планет. Из-за этого возникает ограниченность небесно-механических моделей движения малых тел, допускающая прогноз их движения всего на несколько тысяч лет, – то есть на величину ничтожно малую по сравнению со временем существования Солнечной системы (около 4.6 млрд лет).

За последнее десятилетие XX века человечество осознало реальную опасность со стороны мигрирующих тел Солнечной системы для нашей планеты. Стремление избежать или хотя бы снизить ущерб для цивилизации от столкновения с достаточно крупным астероидом или ядром кометы уже стимулировало проведение крупномасштабных исследований Главного пояса астероидов, причем в ИНАСАН были начаты совершенно оригинальные поисковые исследования метеорных и болидных потоков. Эти исследования позволили подойти к разработке эффективной методики обнаружения небесных тел, грозящих столкновением с Землей.

В начале 1950-х годов было предсказано существование пояса малых тел на периферии Солнечной системы. Начиная с 1992 г. было обнаружено около 500 объектов, обращающихся вокруг Солнца на расстояниях 35 – 47 а.е. Таким образом, произошло реальное обнаружение транснептунового пояса (пояса Койпера) малых тел Солнечной системы. Современные теории космогонии Солнечной системы позволяют считать, что пояс Койпера состоит из тел, сохранившихся со времен формирования нашей планетной системы. В областях, расположенных между орбитами планет-гигантов, также есть условия для сохранения таких тел. Порядка 0.5 % из начальных тел должно было сохраниться между орбитами Юпитера и Сатурна в виде пояса, содержащего много тысяч малых тел. Сходные оценки могут быть сделаны и для областей между орбитами Сатурна и Урана, Урана и Нептуна. Помимо реликтовых объектов, в эти гравитационно-устойчивые области могли быть захвачены объекты, мигрировавшие под действием гравитационных возмущений со стороны планет-гигантов из пояса Койпера.

Распределение малых тел Солнечной системы показывает, что значительное их число имеют среднее движение, соизмеримое с средним движением больших планет. К таким малым телам относятся, например, астероиды семейства Гильды в Главном поясе астероидов (резонанс 3:2 с

Юпитером). Более ста астероидов, так называемых Троянцев, находятся в резонансе 1:1 с Юпитером. Они двигаются в окрестностях точек либрации L_4 и L_5 системы Солнце–Юпитер. Наличие Троянцев среди астроидов уже давно вызывало идеи, что на резонансных орбитах с другими большими планентами также могут находиться малые планеты. К настоящему времени открыто три астероида, имеющие орбиты, близкие к резонансу 1:1 с Марсом.

Численное интегрирование задачи N-тел показывает, что для каждой из внешних планет от Юпитера до Нептуна могут существовать устойчивые орбиты резонанса 1–1. В случае Юпитера – Троянские астероиды. Они устойчивы по крайней мере на десять миллионов лет. Наличие таких орбит для Сатурна может удивить из-за периодической близости Юпитера. Этот случай подробно анализировался, и было найдено доказательство значимости резонансов в стабильности сатурнианских треугольных Лагранжевых точек [1].

Выполнено большое количество исследований, посвященных теоретическому анализу устойчивости орбит тел, находящихся в резонансе 1:1 с Сатурном в рамках ограниченной задачи четырех тел: Солнце, Юпитер, Сатурн и малое тело. Аналитическое развитие модели показывает отсутствие периодических решений в случае больших колебаний в окрестности точек либрации [2].

Дальнейшие теоретические разработки показали, что тела с малым (менее 12°) наклонением орбит могут существовать в треугольных лагранжевых точках Сатурна на космогонической шкале времени (выживает около 1 % всех пробных тел) [3, 4].

Если предположить, что размеры резонансных с Сатурном астероидов примерно соответствуют таковым для Троянцев, то ожидаемая звездная величина оказывается примерно равной 20.5^m и слабее. Объекты такой яркости могут быть обнаружены современными средствами наблюдений.

Для проведения поисковых наблюдений астероидов, находящихся в резонансе 1:1 с Сатурном был использован 2-м телескоп, установленный на пике Терскол. Основные характеристики инструмента и обсерватории приведены в работах [5, 6]. Для проведения наблюдений использовалась ПЗС-камера 512 × 512, охлаждаемая жидким азотом, установленная в фокусе Кассегрена с фокальным редуктором [7]. При этом масштаб изображения составляет около $1''$ на пиксель. Проницающая способность при использовавшихся 30-мин экспозициях достигает 23^m. Измерение снимков проводилось по звездам каталога USNO–2. Точность ошибок редукции составляляет около $0.35''$, а точность определения положений слабых объектов – около $0.5''$.

Наблюдения проводились в период с декабря 1999 г. по апрель 2002 г. Поля наблюдений выбирались вблизи эфемеридных положений точек либрации L_4 и L_5 системы Солнце–Сатурн. Поля выбирались с учетом отсутствия в них ярких звезд для получения максимальной проницающей способности. Каждое избранное поле наблюдалось не менее трех раз в ночь.

Всего было отнаблюдено 120 объектов. Из них 24 являются известными астероидами, 11 – новыми астероидами, которым по наблюдениям на обсерватории Терскол были присвоены Международным центром малых планет временные обозначения. На основании этих наблюдений обсерватория на пике Терскол была включена в международный список под номером B18. Для определения орбит осташихся 85 объектов использовался разработанный в ИНАСАН численный метод прямого счета орбит наряду с классическим методом расчета круговых орбит. Для 14 объектов орбиту рассчитать не удалось. По полученным орбитам два объекта отнесены к сближающимся с Землей, 60 – к астероидам Главного пояса, 9 – к астероидам, расположенным за орбитой Юпитера. Среди этих последних два расположены между орбитами Юпитера и Сатурна, пять – между орбитами Сатурна и Урана, два – между орбитами Урана и Нептуна.

Обнаруживались высокоорбитальные искусственные спутники Земли (по несколько объектов каждую ночь). Спутники селектировались по полученным траекторным измерениям в течение ночи.

В течение первого этапа разрабатывалась методика обнаружения малых тел вблизи Земли с учетом специфики движения наблюдаемых объектов. Разработаны алгоритмы, создаются и модернизируются программы обработки наблюдений. В качестве опорного каталога используется каталог USNO–2A, который содержит координаты и звездную величину звезд до 21^m. Проведена первоначальная оценка наблюдательных возможностей 2-м телескопа обсерватории Терскол. Точность определения координат при этом не должна превышать $0.5''$. Регистрация времени производится с точностью не хуже 0.005 с с привязкой к сигналам точного времени. Точность определения блеска исследуемого объекта не должна превышать 0.1^m.

Проведен анализ источников засорения околоземного пространства. В качестве областей проведения первоначальных поисковых наблюдений выделены область вблизи антисолнечной точки и область концентрации элементов космического мусора, близких к геостационарной орбите, которая выявлена по данным зарубежных наблюдательных средств. С 7 по 21 марта 2002 г. проведены экспериментальные поисковые наблюдения элементов космического мусора в этих точках. Результаты наблюдений обрабатываются.

В апреле 2002 г. был проведен сеанс квазисинхронных наблюдений, с целью одновременной регистрации тел метрового и декаметрового размеров в болидном потоке Комиды. Наблюдения проводились с четырех пунктов – Терскол, Звенигород, Монды и Симеиз. Сеанс обработан и проанализирован. Всего за сеанс на Терсколе было обнаружено 11 объектов. Четыре из них оказались известными астероидами (K01A07D, J93S10N, K01A07D, K00U36J). Один из обнаруженных объектов наблюдался одновременно с двух обсерваторий – Терскол и Монды (K01A07D). Два объекта Центром малых планет Международного астрономического союза (МАС) были признаны новыми, и им присвоены номера: K02G05B и K02G05C.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 00-02-16118) и контракта 40.022.1.1.1108 с Министерством промышленности, науки и технологии России.

[1] *Innanen K. A., Mikkola S.* Studies on solar system dynamics. I The stability of Saturnian Trojans // Astron. J.–1989.–**97**.–P. 900–908.

[2] *Banfi V.* A study on the large oscillation stability of Trojan asteroids around libration points // Accademia Nazionale dei Lincei, Atti, Rendiconti – Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali.–**58**.–P. 220–229.

[3] *Teger F.* On the Stability of the L_4 and L_5 Triangular Lagrangian Points of Saturn // American Astronomical Society, DPS meeting N 31, 20.09.

[4] *Melita M. D., Brunini A.* // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.–2001.–**322**.–P. L17–L21.

[5] *Бек Г. Г.* Уровень и тенденции развития астроприборостроения народного предприятия “Карл Цейсс Йена” // Йенское обозрение.–1976.–№ 3/4.–С. 125.

[6] *Тарадий В. К., Сергеев А. В., Карпов Н. В., Руденко С. П.* Астрономический комплекс на пике Терскол для наблюдений малых тел Солнечной системы // Околоземная астрономия и проблема изучения малых тел Солнечной системы / Под ред. Л. В. Рыхловой.–М.: Космосинформ, 2000.–С. 163–167.

[7] *Jockers K.* A two-channel fokal reductor small (diametr > 1 m) F/8 telescopes // MPAE-W-086-96-01.–1996.–P. 1–14.