

УДК 523.2

МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ НЕБА ОБЪЕКТОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

Ипатов С. И., Еленин Л. В.

MODELS FOR CALCULATION OF THE PROBABILITIES OF DETECTION
OF NEAR-EARTH OBJECTS IN DIFFERENT SKY REGIONS

Ipatov S. I.^{*,**}, Elenin L. V.^{***}

* V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS, Moscow, 119991, Russia

** Space Research Institute of RAS, Moscow, 117997, Russia

*** M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow, 125047, Russia
e-mail: siipatov@hotmail.com

Abstract. An approach is proposed for constructing celestial maps of the distribution of the probabilities of the appearance and detection of near-Earth objects (NEOs), including objects potentially dangerous for Earth inhabitants. The proposed model will take into account the distribution of NEOs over mass and orbital elements obtained after the observational selection. The results of calculations of the migration of bodies from various regions of the solar system to the Earth's orbit will be used for construction of the distributions of the incoming bodies over their orbital elements. The construction of sky brightness models for telescopes used in observations is discussed, and the approaches for comparison of NEOs search efficiency by different telescopes (including the ISON-NM and ISON-SSO telescopes and projected space telescopes) are considered. The proposed models will allow observers to understand to which regions of the sky it is needed to pay more attention during observations. The comparison of the distribution of the discovered NEOs by their orbital elements corrected by taking into account the observational selection with similar distributions of bodies coming from different regions of the solar system will allow one to evaluate the role of different NEOs replenishment sources (asteroids, comets, trans-Neptunian objects) for various orbital elements of NEOs and for various observational regions. This comparison will allow one to better understand the typical composition of NEOs in different orbits.

Keywords: near-Earth objects, probabilities of detection, observational selection, migration of bodies, sky brightness model, telescope, search efficiency

Введение

Проблема астероидно-кометной опасности рассматривается во многих работах, например, в [1] и в монографиях [2, 3]. Число объектов, сближающихся с Землей, (ОСЗ) диаметром более 1 км и 40 м оценивается в тысячу и миллион объектов, соответственно [3]. Тело размером с Челябинский метеорит (диаметром около 20 м), упавшее на город, может привести к значительному ущербу. Для организации наблюдений опасных объектов и противодействия столкновениям этих объектов с Землей важно лучше знать, каким областям неба нужно уделять большее внимание

при наблюдениях ОСЗ, сравнить эффективность обнаружения ОСЗ различных размеров различными наземными и проектируемыми космическими телескопами, а также оценить какое происхождение (а значит и какой состав) более вероятно могут иметь ОСЗ, движущиеся по рассматриваемым орбитам, и с какими типичными скоростями и под какими типичными углами эти ОСЗ сталкиваются с Землей.

В настоящей статье предлагается подход к построению небесных карт распределения вероятностей появления и обнаружения объектов, сближающихся с Землей. Предлагаемая модель будет учитывать распределение ОСЗ

Ипатов Сергей Иванович, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института геохимии и фналитической химии имени В.И. Вернадского РАН; e-mail: siipatov@hotmail.com.

Еленин Леонид Владимирович, научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН; e-mail: l.eelenin@gmail.com.

по массам и элементам орбит с учетом наблюдательной селекции и результаты расчетов миграции тел из различных областей Солнечной системы к орбите Земли. Обсуждается построение моделей звездного неба для используемых при наблюдениях телескопов, подходы к сравнению эффективности поиска ОСЗ различными телескопами и к оценкам роли источников пополнения ОСЗ (астероидов, комет, транснептуновых объектов).

1. Построение модели распределения вероятности обнаружения ОСЗ на небесной сфере

При построении модели вероятности появления и обнаружения ОСЗ в различных областях неба предлагается использовать моделируемое распределение ОСЗ по элементам их орбит и массам. Наблюдаемое распределение ОСЗ отличается от реального распределения, так как вероятности обнаружения ОСЗ зависят от их орбит, размеров и физических свойств (альбедо). Например, внутренних ОСЗ семейства Атиры (орбиты которых полностью лежат внутри земной орбиты, и афелийное расстояние которых меньше перигелийного расстояния Земли), в настоящий момент, открыто не более двух десятков, а их доля в ОСЗ может быть гораздо больше, чем для обнаруженных астероидов. Учитывая наблюдательную селекцию, на основе популяции известных ОСЗ можно оценить реальное распределение ОСЗ по элементам их орбит. Вопросы наблюдательной селекции и ее влияния на выборку обнаруживаемых ОСЗ рассматривались, например, в [4].

Построение карты распределения вероятности обнаружения ОСЗ на небесной сфере на текущую наблюдательную ночь проводилось в США [5, 6]. Однако результаты были опубликованы только в виде кратких тезисов, и тем более у российских наблюдателей нет возможности воспользоваться этими программами для планирования наблюдений. Полезно было бы разработать программы построения таких карт. Эти программы и используемые ими модели яркости звездного неба были бы ориентированы на российские телескопы.

В [7] при сравнении эффективности поиска астероидов девятью разными телескопами зависимость эффективности поиска от яркости звездного неба не рассматривалась, и учет наблюдательной селекции орбит не проводил-

ся. Просто интегрировалось движение известных астероидов и определялось, попадают ли они в поле зрения телескопов в рассматриваемую ночь. В предлагаемой нами модели вероятности появления и обнаружения ОСЗ на небесной сфере предлагается учитывать модели звездного неба, наблюдательную селекцию орбит и масс, а также результаты расчетов миграции малых тел. Вероятности появления и обнаружения ОСЗ на небесной сфере предлагается вычислять не только для всех ОСЗ, но и впервые отдельно для ОСЗ, имеющих различное происхождение, а также для ОСЗ, проходящих на небольшом расстоянии около Земли и для объектов, которые могут столкнуться с Землей.

Вероятности появления и обнаружения ОСЗ, в том числе опасных для жителей Земли, различных размеров на различных участках звездного неба предлагается исследовать не только для наблюдений с Земли, но и из нескольких областей, куда планируется запустить космические аппараты с телескопами для наблюдения ОСЗ. Так как эти космические аппараты движутся вне атмосферы и далеко от Луны, то вероятность обнаружения ими ОСЗ будет больше, чем при наблюдениях с Земли.

2. Модели для оценок роли различных источников ОСЗ

На основе сравнения распределения наблюдаемых ОСЗ по элементам их орбит с учетом факторов наблюдательной селекции с распределениями, полученными для тел, пришедших из различных источников (астероиды, тела транснептунового пояса, кометы семейства Юпитера, долгопериодические кометы, кентавры) могут быть сделаны оценки роли различных источников пополнения ОСЗ. Аналогичные исследования источников пополнения могут быть сделаны для потенциально опасных объектов, чьи орбиты сближаются с орбитой Земли до минимального расстояния (MOID), не превышающего 0.05 а.е. Сравнение распределения наблюдаемых ОСЗ по элементам их орбит с аналогичными распределениями, полученными при расчетах миграции различных малых тел, позволит лучше понять распределение ОСЗ по элементам орбит для тел малых размеров, а также типичные орбиты ОСЗ, пришедших из различных источников, а значит имеющих

различный состав и альбедо. Модель вероятности появления различных ОСЗ на рассматриваемом участке неба, использующая типичные орбиты ОСЗ, пришедших из различных источников, позволит лучше представлять вероятный состав и происхождение ОСЗ, наблюдаемых в данном участке неба.

Подходы к решению задачи определения источников ОСЗ во многом перекликаются с использовавшимися ранее подходами к решению задачи определения источников зодиакальной пыли. Сравнивая наблюдаемые спектры зодиакальной пыли с моделируемыми спектрами пыли, порождаемой различными источниками, Ипатов и др. [8] оценили доли зодиакальной пыли, порождаемой астероидами, кометами, движущимися внутри орбиты Юпитера, и малыми телами, находящимися за орбитой Юпитера, равными примерно одной трети (от общего количества зодиакальной пыли) для каждого из этих источников.

При оценках источников ОСЗ, проведенных в работе [9], моделировалась эволюция орбит нескольких тысяч астероидов и комет (причем влияние планет земной группы на эволюцию орбит комет не учитывалось) и рассматривалось всего 138 известных в то время ОСЗ. В настоящее время известны орбиты уже почти 15000 ОСЗ (в сто раз больше, чем в [9]). При новых оценках источников ОСЗ можно будет провести расчеты эволюции орбит гораздо большего числа различных небесных тел. Более 10 лет назад Ипатовым ([10–13], и др.) проводились расчеты эволюции орбит десятков тысяч астероидов, комет и транснептуновых объектов (за динамическое время их жизни, то есть до того времени, когда объекты выбрасывались на гиперболические орбиты или сталкивались с Солнцем или планетами). При этом вычислялись вероятности столкновений этих объектов с планетами. Сейчас обычный персональный компьютер, имеющий несколько ядер, позволяет делать минимум на порядок больше расчетов, чем обычный компьютер 10–15 лет назад. Еще больше увеличить скорость расчетов позволит использование при вычислениях вычислительных кластеров с большим числом ядер. Можно рассмотреть подробнее, чем ранее, эволюцию орбит различных малых тел, включая транснептуновые объекты и кентавры. Можно также использовать массивы элементов орбит мигрирующих малых

тел, полученные ранее при предыдущих расчетах [10, 12, 13]. На основе изучения миграции тел, наряду с построением распределения тел, двигавшихся по орбитам ОСЗ, по элементам орбит можно рассмотреть вероятности столкновений тел с Землей, а также изучить распределения скоростей столкновений тел с Землей по углам столкновений и по абсолютной величине, как для всех ОСЗ, так и для отдельных групп ОСЗ.

Результаты предлагаемых исследований миграции малых тел помогут уточнить массу и состав вещества, доставленного с различных расстояний от Солнца в популяцию ОСЗ, а также к планетам земной группы и Луне. Они будут важны для специалистов, занимающихся проблемой кратерообразования и оценками состава вещества в верхних слоях и на поверхности планет земной группы и Луны. Эти исследования позволят подробно изучить распределение векторов скоростей тел, сталкивающихся с планетами земной группы и Луной.

3. 3. Расчет вероятности обнаружения небесного тела

Остановимся ниже на некоторых деталях предлагаемого подхода к построению алгоритма вероятности обнаружения конкретным телескопом ОСЗ определенных размеров на данном участке неба в данный интервал времени. Расчеты вероятности обнаружения небесного тела с заданным блеском для различных областей звездного неба нужно проводить для определенного интервала времени и определенного места наблюдений. Следует также учитывать параметры конкретного телескопа, в частности, проникающую способность телескопа (то есть звездную величину I_{tel} наиболее слабых звезд, видимых с помощью телескопа в зените), и поле зрения телескопа. Расчеты должны включать циклы по различным телам и по различным моментам времени из рассматриваемого интервала времени. Элонгация (угол между телом и Солнцем, видимый с Земли) также является ограничивающим фактором, так как наземные средства наблюдения в обычном режиме не работают на элонгациях менее 60 градусов.

При оценках вероятности обнаружения объекта, с заданным блеском и текущим положением на небесной сфере, с помощью космических телескопов следует учитывать дви-

жение космического телескопа относительно Земли. Чем выше скорость перемещения объекта на небесной сфере, тем меньше вероятность его обнаружения. Это связано с тем, что за время экспозиции отметка от объекта на ПЗС-матрице будет вытянута в трек, поверхностная яркость которого, меньше чем яркость центроида. Для учета данного фактора следует применять модель зависимости проницания телескопа от угловой скорости обнаруживаемых объектов.

4. Моделирование орбиты и звездной величины небесного тела, а также вычисление его положений на орбите, при которых оно может наблюдаться

После вероятностного выбора элементов орбиты и звездной величины I_{body} небесного тела (на основе распределения моделируемых ОСЗ по элементам их орбит и массам) сначала с учетом расстояния от наблюдателя до точки орбиты нужно определять положение тела на орбите, при которых оно может наблюдаться в идеальных условиях наблюдения. Затем этот интервал, если он ненулевой, нужно уточнять с учетом яркости звездного неба около рассматриваемого тела и возможности телескопа наблюдать данную область неба. В ряде расчетов моделирование орбиты и звездной величины небесного тела, а также его положений на орбите, при которых оно может наблюдаться, можно проводить только в тех случаях, когда небесное тело пройдет на минимальном расстоянии от Земли, меньшем определенной величины (например, 0.05 а.е.).

При рассмотрении моделируемых ОСЗ, пришедших из разных областей Солнечной системы, следует учитывать их разные типичные альбедо, так как абсолютная звездная величина небесного объекта зависит не только от его размера, но и от альбедо. Видимая звездная величина зависит также от расстояния между наблюдателем и небесным телом и от положений Луны, Солнца и наблюдаемого объекта, в частности, от фазового угла (угла между лучом света, падающим от Солнца на наблюдаемое небесное тело, и лучом, отразившимся от него в сторону наблюдателя), от границ Млечного пути (дистанции от галактического экватора).

5. Определение яркости звездного неба

В предлагаемом алгоритме вычисления вероятности обнаружения ОСЗ нужно вычислять яркость I_{sky} звездного неба и максимально возможную звездную величину $I_{\text{body-max}}$ наблюдаемого небесного тела для рассматриваемого направления наблюдений в рассматриваемый момент времени (где $I_{\text{body}} \leq I_{\text{body-max}} = I_{\text{tel}} - I_{\text{sky}}$). При разработке алгоритма вероятности обнаружения объекта на небесной сфере можно использовать разработанные Ипатовым [14] программы, позволяющие определять яркость звездного неба для заданных координат и характеристик телескопа, области наблюдаемого неба и времени наблюдения. Эти программы использовались в [15] для сравнения эффективности наблюдений событий микролинзирования различными зарубежными телескопами в рамках программы поиска экзопланет методом микролинзирования. При построении модели звездного неба и зависимости яркости неба от воздушной массы (airmass), которая характеризует путь света через земную атмосферу и приблизительно равняется секансу зенитного угла, для конкретного телескопа в [14] обрабатывались данные наблюдений зарубежных телескопов, использовавшихся для поиска экзопланет методом микролинзирования.

Алгоритм вычисления яркости звездного неба, использовавшийся в [14], может быть адаптирован к использованию данных наблюдений российских телескопов (в том числе, телескопов ISON-NM и ISON-SSO) на основе анализа снимков, сделанных этими телескопами. В этом алгоритме значение $I_{\text{sky}}(0)$ яркости неба на квадрат дуговой секунды в зените выбиралось таким образом, чтобы сумма квадратов разностей между наблюдаемыми и моделируемыми значениями яркостей неба была минимальной при этом значении $I_{\text{sky}}(0)$ в случае, когда Луна ниже горизонта. При вычислении яркости b для конкретного значения a воздушной массы вычисление коэффициентов b_o и b_{1o} основано на χ^2 оптимизации прямой линии

$$b = b_{1o}(a - 1) + b_o,$$

$$\chi^2 = \sum \left[\frac{b_j - b_{1o}(a_j - 1) - b_o}{\sigma_b} \right]^2,$$

σ_b^2 — это дисперсия, b_j — наблюдательная яркость при воздушной массе a_j для наблю-

дений, проведенных в то время когда Луна находилась ниже горизонта.

6. Моделирование сравнения эффективности поиска ОСЗ с помощью различных телескопов

Алгоритм, позволяющий получить карту распределения вероятности обнаружения ОСЗ на конкретную наблюдательную ночь, позволит для конкретного телескопа исследовать на каких расстояниях от наблюдателя и в каких областях неба более вероятно обнаружить тела определенного размера. Предлагаемая модель позволит наблюдателям ОСЗ лучше понимать, каким областям неба уделять больше внимания при наблюдениях. Для рассматриваемых телескопов можно будет дать рекомендации об интервалах наблюдений, при которых выше вероятность обнаружения ОСЗ.

На основе модели определения вероятности появления и обнаружения ОСЗ можно провести сравнение эффективности поиска ОСЗ с помощью различных телескопов в различные интервалы времени. Это сравнение будет включать сравнение числа ОСЗ, которые могут наблюдаться рассматриваемым телескопом, и интервалов времени, в течение которых моделируемые ОСЗ доступны для наблюдения этим телескопом. При сравнении эффективности поиска ОСЗ различными телескопами при моделировании следует использовать одинаковые распределения моделируемых ОСЗ по элементам орбит и звездной величине, а также одинаковый интервал наблюдений. Предлагаемые исследования эффективности поиска ОСЗ различными телескопами позволят лучше понимать, в какие интервалы времени лучше наблюдать ОСЗ тем или иным телескопом, и тем самым повысить эффективность поиска ОСЗ существующими телескопами и дать рекомендации по созданию новых, в том числе космических, телескопов, предназначенных для поиска ОСЗ.

Сравнение эффективности поиска ОСЗ различными проектируемыми космическими телескопами позволит выбрать орбиты и параметры космических телескопов, обеспечивающие наиболее эффективный поиск ОСЗ, и, в частности, объектов, которые могут столкнуться с Землей. Так как эти космические аппараты движутся вне атмосферы и далеко

от Луны, то вероятность обнаружения ими ОСЗ больше, чем при наблюдениях с Земли.

Заключение

Предлагаемая модель вероятности появления и обнаружения в различных областях неба потенциально опасных для землян объектов позволит наблюдателям лучше понимать, каким областям неба стоит уделять больше внимания при наблюдениях в определенную эпоху. Эта модель может быть применена для более эффективной эксплуатации оптических инструментов поиска и обнаружения ОСЗ (в частности, телескопов ISON-NM и ISON-SSO). Предлагаемые алгоритмы вычисления яркости звездного неба могут быть использованы астрономами при планировании наблюдений различных объектов. Предлагаемые исследования эффективности поиска ОСЗ различными телескопами позволят сравнить эффективность наблюдений различными наземными и проектируемыми космическими телескопами и дать рекомендации по созданию и размещению новых, в том числе космических, телескопов, предназначенных для поиска ОСЗ.

Для организации наблюдений опасных для землян объектов и противодействия столкновению таких объектов с Землей важно оценить, какое происхождение (а значит и какой состав) более вероятно могут иметь ОСЗ, движущиеся по данным орбитам, с какими типичными скоростями и под какими типичными углами эти ОСЗ сталкиваются с Землей. Эти оценки можно получить на основе изучения миграции малых тел из различных областей Солнечной системы к орбите Земли.

Литература

1. Шустов Б.М., Нароенков С.А., Емельяненко В.В., Шугаров А.С. Астрономические аспекты построения системы обнаружения и мониторинга опасных космических объектов // Астрономический вестник. 2013. Т. 47. № 4. С. 312–320.
2. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б.М. Шустова и Л.В. Рыхловой. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 384 с.
3. Handbook of cosmic hazards and planetary defense / Ed. by J.N. Pelton and F. Allahdadi. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 1127 p. DOI: 10.1007/978-3-319-03952-7
4. Emel'yanenko V.V., Naroenkov S.A. Dynamical features of hazardous near-Earth objects // Astrophysical Bulletin. 2015. Vol. 70. No. 3.

- P. 342-348. DOI: 10.1134/S199034131503013X (Имеется перевод: Емельяненко В.В., Нароенков С.А. Динамические особенности опасных околоземных объектов // *Астрофизический бюллетень*. 2015. Т. 70. С. 243–249).
5. *Tricarico P.* A distributed computing system for near-Earth objects hazard monitoring // Abstracts of the 36th DPS meeting, #32.17. *Bulletin of the American Astronomical Society*. 2004. Vol. 36. P. 1141.
 6. *Tricarico P.* An efficient search strategy for near-Earth asteroids // Abstracts of the 38th Lunar and Planetary Science Conference. 2007. No. 1338. P. 2357.
 7. *Tricarico P.* Detection efficiency of asteroid surveys // *The Astronomical Journal*. 2016. Vol. 151, article id. 80, 7 p. DOI: 10.3847/0004-6256/151/3/80
 8. *Ipatov S.I., Kuttyrev A., Madsen G.J., Mather J.C., Moseley S.H., Reynolds R.J.* Dynamical zodiacal cloud models constrained by high resolution spectroscopy of the zodiacal light // *Icarus*. 2008. Vol. 194. No. 2. P. 769–788. DOI: 10.1016/j.icarus.2007.11.009. <http://arxiv.org/abs/0711.3494>
 9. *Bottke W.F. Jr., Morbidelli A., Jedicke R., Petit J.-M., Levison H.F., Michel P., Metcalfe T.S.* Debaised orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects // *Icarus*. 2002. Vol. 156. P. 399–433. DOI: 10.1006/icar.2001.6788
 10. *Ipatov S.I., Mather J.C.* Migration of trans-Neptunian objects to the terrestrial planets // *Earth, Moon, and Planets*. 2003. Vol. 92. P. 89–98. DOI: 10.1023/B:MOON.0000031928.45965.7b. http://www.roe.ac.uk/~jkd/kbo_proc/ipatov.pdf
 11. *Ipatov S.I., Mather J.C.* Comet and asteroid hazard to the terrestrial planets // *Advances in Space Research*, 2004. Vol. 33. No 9. P. 1524–1533. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00451-4. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0212177>
 12. *Ipatov S.I., Mather J.C.* Migration of small bodies and dust to near-Earth space // *Advances in Space Research*. 2006. Vol. 37. No. 1. P. 126–137. DOI: 10.1016/j.asr.2005.05.076. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0411004>
 13. *Ipatov S.I., Mather J.C.* Migration of comets to the terrestrial planets // *Proceedings of the IAU Symposium No. 236 “Near-Earth Objects, Our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk”* / Ed. by G.B. Valsecchi and D. Vokrouhlicky. 2007. P. 55–64. DOI: 10.1017/S1743921307003067. <http://arxiv.org/format/astro-ph/060972>
 14. *Ipatov S.I., Horne K.* Models of sky brightness // Abstracts of the 45th Lunar and Planetary Science Conference. 2014. No. 1390. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2014/pdf/1390.pdf>
 15. *Ipatov S.I., Horne K., Alsubai, K., Bramich D., Dominik M., Hundertmark M., Liebig C., Snodgrass C., Street R., Tsapras Y.* Simulator for microlens planet surveys // *Proc. of the IAU Symp. No. 293 “Formation, detection, and characterization of extrasolar habitable planets”* / Ed. by N. Haghighipour. Cambridge University Press. 2014. P. 416–419. DOI: 10.1017/S1743921313013306. <http://arxiv.org/abs/1308.6159>

References

1. Shustov B.M., Naroenkov S.A., Emel’yanenko V.V., Shugarov A.S. Astronomical aspects of building a system for detecting and monitoring hazardous space objects. *Solar System Research*, vol. 47, no. 4, pp. 288–295. DOI: 10.1134/S0038094613040199).
2. *Asteroidno-kometnaja opasnost’: vchera, segodnja, zavtra* [Asteroid and comet hazard: yesterday, today, tomorrow]. Eds. B.M. Shustov, L.V. Ryhlova, Moscow, FIZMATLIT, 2010, 384 p.
3. *Handbook of cosmic hazards and planetary defense*. Eds. J.N. Pelton, F. Allahdadi. Switzerland: Springer International Publishing, 2015, 1127 p. DOI: 10.1007/978-3-319-03952-7
4. Emel’yanenko V.V., Naroenkov S.A. Dynamical features of hazardous near-Earth objects. *Astrophysical Bulletin*, 2015, vol. 70, no. 3, pp. 342–348. DOI 10.1134/S199034131503013X (Russian version: Emel’yanenko V.V., Naroenkov S.A. Dinamicheskie osobennosti opasnykh okolozemnykh ob’ektov [Dynamical features of hazardous near-Earth objects]. *Astrofizicheskij bjulleten’* [Astrophysical bulletin], 2015, vol. 70, pp. 243–249).
5. Tricarico P. A distributed computing system for near-Earth objects hazard monitoring. *Abstracts of the 36th DPS meeting, #32.17. Bulletin of the American Astronomical Society*, 2004, vol. 36, p. 1141.
6. Tricarico P. An efficient search strategy for near-Earth asteroids. *Abstracts of the 38th Lunar and Planetary Science Conference*, 2007, no. 1338, p. 2357.
7. Tricarico P. Detection efficiency of asteroid surveys. *The Astronomical Journal*, 2016, vol. 151, article id. 80, 7 pp. DOI: 10.3847/0004-6256/151/3/80
8. Ipatov S.I., Kuttyrev A., Madsen G.J., Mather J.C., Moseley S.H., Reynolds R.J. Dynamical zodiacal cloud models constrained by high resolution spectroscopy of the zodiacal light. *Icarus*, 2008, vol. 194, no. 2, pp. 769–788. DOI: 10.1016/j.icarus.2007.11.009. <http://arxiv.org/abs/0711.3494>
9. Bottke W.F. Jr., Morbidelli A., Jedicke R., Petit J.-M., Levison H.F., Michel P., Metcalfe T.S. Debaised orbital and absolute magnitude distribu-

- tion of the near-Earth objects. *Icarus*, 2002, vol. 156, pp. 399–433. DOI: 10.1006/icar.2001.6788
10. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of trans-Neptunian objects to the terrestrial planets. *Earth, Moon, and Planets*, 2003, vol. 92, pp. 89–98. DOI: 10.1023/B:MOON.0000031928.45965.7b. http://www.roe.ac.uk/~jkd/kbo_proc/ipatov.pdf
 11. Ipatov S.I., Mather J.C. Comet and asteroid hazard to the terrestrial planets. *Advances in Space Research*, 2004, vol. 33, no 9, pp. 1524–1533. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00451-4. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0212177>
 12. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of small bodies and dust to near-Earth space. *Advances in Space Research*, 2006, vol. 37, no. 1, pp. 126–137. DOI: 10.1016/j.asr.2005.05.076. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0411004>
 13. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of comets to the terrestrial planets. *Proc. of the IAU Symposium No. 236 “Near-Earth Objects, Our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk”*. Eds. G.B. Valsecchi and D. Vokrouhlicky, 2007, pp. 55–64. DOI: 10.1017/S1743921307003067. <http://arxiv.org/format/astro-ph/060972>
 14. Ipatov S.I., Horne K. Models of sky brightness. *Abstracts of the 45th Lunar and Planetary Science Conference*, 2014, no. 1390. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2014/pdf/1390.pdf>
 15. Ipatov S.I., Horne K., Alsubai, K., Bramich D., Dominik M., Hundertmark M., Liebig C., Snodgrass C., Street R., Tsapras Y. Simulator for microlens planet surveys. *Proceedings of the IAU Symp. No. 293 “Formation, detection, and characterization of extrasolar habitable planets”*. Ed. N. Haghighipour, Cambridge University Press, 2014, pp. 416–419. DOI: 10.1017/S1743921313013306. <http://arxiv.org/abs/1308.6159>