

MULTI-PURPOSE EXPEDITIONS TOWARDS ASTEROIDS FLYING NEAR THE EARTH

Anatoly V. ZAITSEV,
Honorary Member, The Russian Academy of Cosmo-
nautics named after K.E. Tsiolkovsky; Academician,
International Futures Research Academy (IFRA); CEO,
NPP “Planetary Defence Centre”, Khimki, Russia,
zav-y@yandex.ru

Dmitry V. PETROV,
Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Chief Designer,
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Rus-
sian Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk,
Russia

Vladimir N. NOGIN,
Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Chief of Depart-
ment, Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russian Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

Vasily P. ELSUKOV,
Laboratory Chief; the Russian Federal Nuclear Center
– Zababakhin n All-Russian Research Institute of
Technical Physics, Snezhinsk, Russia

Dmitry A. KRASNOSLABODTSEV,
Research Associate, the Russian Federal Nuclear
Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of
Technical Physics, Snezhinsk, Russia

Vadim A. SIMONENKO,
Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Deputy
Scientific Director, the Russian Federal Nuclear Center
– Zababakhin All-Russian Research Institute of Tech-
nical Physics, Snezhinsk, Russia,
v.a.simonenko@vniitf.ru

Alexander I. SOROKA,
JSC Space Systems of Information,
Moscow, Russia,
sorokaai@mail.ru

ABSTRACT | The paper argues in support of multi-purpose missions to near-Earth space objects to study their properties and to develop methods and means for establishing a planetary defense system. The characteristics of spaceships for the missions and their instrumentation and equipment are provided. Remote and on-site investigation methods are discussed, including gravity measurements and hyper-velocity impact experiments, and integration of collected results for the evaluation of object properties.

Keywords: *asteroid-comet hazard, planetary defense, spaceship, penetrator, hyper-velocity impact, gravi-gradiometry*

МНОГОЦЕЛЕВЫЕ ЭКСПЕДИЦИИ К АСТЕРОИДАМ, ПРОЛЕТАЮЩИМ В БЛИЗИ ЗЕМЛИ

АННОТАЦИЯ | Обосновывается возможность организации многоцелевых экспедиций к астероидам, пролетающим в околоземном космическом пространстве, с целью изучения их планетофизических характеристик, а также одновременной отработки методов и средств для создания системы планетарной защиты от таких объектов. Приведены характеристики космических аппаратов для осуществления этих экспедиций и состава их исследовательской аппаратуры. Рассмотрены методы дистанционных и прямых исследований, включающие измерения гравитационных параметров объектов и проведение гиперскоростных ударных экспериментов, а также вопросы интеграции полученных измерений для оценки свойств этих объектов.

Ключевые слова: астероидно-кометная опасность, планетарная защита, космический аппарат, пенетратор, гиперскоростной удар, гравиградиентометрия



Анатолий Васильевич ЗАЙЦЕВ, почетный член Российской академии космонавтики имени К. Э. Циолковского (РАКЦ), академик Международной академии исследований будущего (МАИБ), генеральный директор НП «Центр планетарной защиты», Химки, Россия, zav-y@yandex.ru



Дмитрий Витальевич ПЕТРОВ, доктор физико-математических наук, главный конструктор – начальник конструкторского бюро № 1 Российского федерального ядерного центра – ВНИИ технической физики имени Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия



Владим Николаевич НОГИН, кандидат физико-математических наук, начальник отдела Российского федерального ядерного центра – ВНИИ технической физики имени Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия



Василий Павлович ЕЛСУКОВ, начальник лаборатории Российского федерального ядерного центра – ВНИИ технической физики имени Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия



Дмитрий Александрович КРАСНОСЛАБОДЦЕВ, научный сотрудник Российского федерального ядерного центра – ВНИИ технической физики имени Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия



Вадим Александрович СИМОНЕНКО, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель научного руководителя Российского федерального ядерного центра – ВНИИ технической физики имени Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия, v.a.simonenko@vniitf.ru

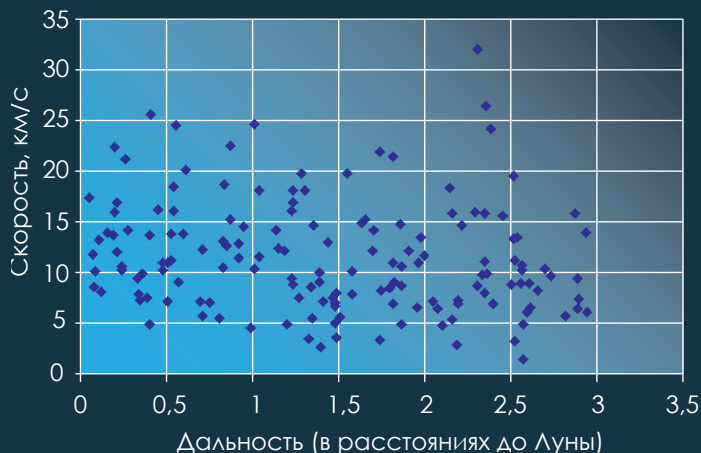


Александр Иванович СОРОКА, главный специалист АО «Пространственные системы информации», Москва, Россия, sorokaai@mail.ru



**ВПОЛНЕ РЕАЛЬНОЙ
ЯВЛЯЕТСЯ
ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛЕТА
К АСТЕРОИДАМ,
ОБНАРУЖЕННЫМ
ПРИМЕРНО ЗА
7-10 СУТОК ДО ИХ
СБЛИЖЕНИЯ С ЗЕМЛЕЙ**

**РИС. 1. СКОРОСТИ ПРОЛЕТА АСЗ
В СФЕРЕ ПРИТЯЖЕНИЯ ЗЕМЛИ В 2016 ГОДУ**



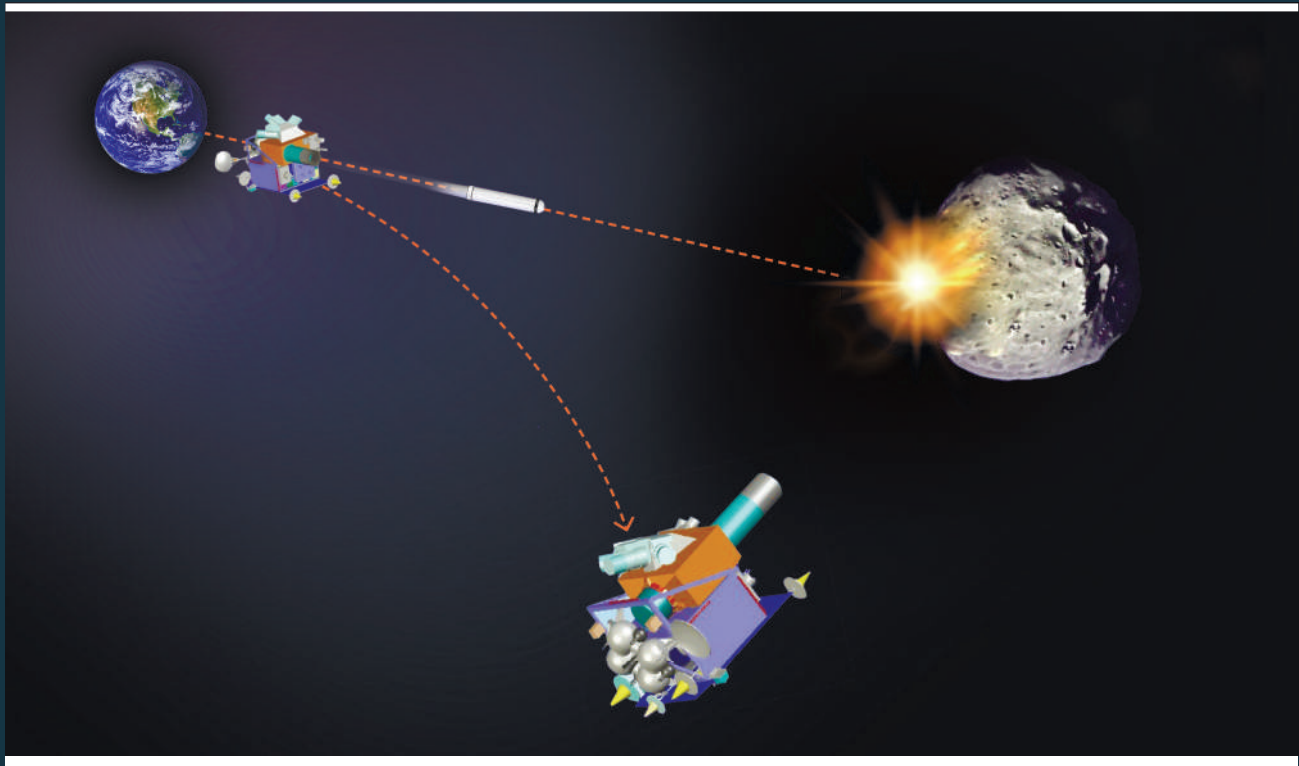
Наличие угрозы катастрофических столкновений с Землей астероидов и ядер комет обуславливает необходимость создания системы планетарной защиты (СПЗ) от астероидно-кометной опасности (АКО). Для этого потребуется осуществить не только отработку всех компонентов системы, но и провести детальные исследования планетофизических характеристик данных небесных тел. Для этих целей уже осуществлен ряд космических проектов – Deep Impact, Stardust, Rosetta – и разрабатываются новые. Одним из них может стать проект «Космический патруль» [1], предусматривающий запуски относительно недорогих космических аппаратов (КА) малого класса к астероидам, пролетающим в сфере притяжения Земли. При этом будет осуществляться изучение астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), и одновременно будут отрабатываться методы и средства их разведки и перехвата.

ВОЗМОЖНОСТЬ ОРГАНИЗАЦИИ ЭКСПЕДИЦИЙ К АСТЕРОИДАМ, СБЛИЖАЮЩИМСЯ С ЗЕМЛЕЙ

По данным NASA [2], в настоящее время обнаружено свыше 18 000 АСЗ, причем многие из них были замечены только при подлете и даже во время пролета сферы притяжения Земли. Например, в 2016 году было обнаружено 143 таких астероида, 52 из которых приблизились к Земле на расстояние меньшее, чем от Земли до Луны. При этом диапазон их скоростей в момент максимального сближения с Землей составлял от 1,44 до 32 км/с (рис. 1), а размеры от 2 до 90 м.

Интервал времени от обнаружения АСЗ до их минимального сближения с Землей составил от 1 до 17 суток, что позволяет в ряде случаев осуществить запуск КА для их изучения. Конечно, для этого необходимо будет иметь в состоянии готовности КА и средства для их оперативного запуска. Анализ длительности операций по подготовке к пуску существующих ракет-носителей (РН) показывает, что подготовка технических средств и разработка программно-алгоритмического обеспечения запуска могут быть выполнены в течение нескольких суток. Длительность же подготовки РН на старте может составлять, как показано на примере возможностей РН «Зенит», около полутора часов [3], а при использовании конверсионной РН «Днепр» – еще меньше.

РИС. 2. СХЕМА МНОГОЦЕЛЕВОЙ ЭКСПЕДИЦИИ К АСЗ



Кроме подготовки к запуску КА, потребуется время для его перелета к АСЗ. Энергетически оптимальным будет перелет к АСЗ по эллиптической траектории. Например, длительность полета до орбиты Луны составит около пяти суток. При необходимости перелет к АСЗ может осуществляться также по ускоренным, гиперболическим траекториям.

Таким образом, вполне реальной является возможность полета к астероидам, обнаруженным примерно за 7-10 суток до их сближения с Землей. Кроме того, можно будет заранее выбрать из числа уже известных астероидов те из них, которые будут пролетать вблизи Земли в ближайшие годы, и заблаговременно подготовить экспедиции к ним.

ПРОЕКТ «КОСМИЧЕСКИЙ ПАТРУЛЬ»

В ходе реализации проекта «Космический патруль», при проведении экспедиций к АСЗ, планируется:

- изучение свойств АСЗ, включая доставку их грунта на Землю;
- изучение физики гиперскоростного удара (до 70-80 км/с);
- отработка кинетических средств воздействия на астероиды;

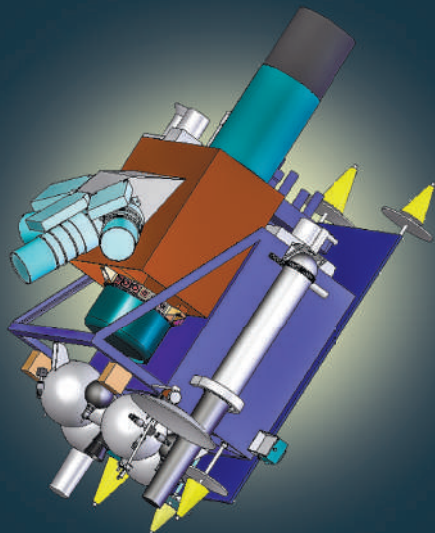
- отработка средств перехвата астероидов – КА-разведчиков и КА-перехватчиков.

При этом в ходе выполнения одной многоцелевой экспедиции могут быть осуществлены следующие эксперименты (рис. 2):

- 1) **«Пролет»** – по отработке КА-разведчика и дистанционных средств изучения небесных тел;
- 2) **«Перехват»** – по отработке средств перехвата опасных небесных тел (ОНТ);
- 3) **«Удар» и «Внедрение»** – по отработке кинетических средств воздействия на ОНТ и изучению их характеристик прямыми (контактными) методами при внедрении в грунт специальных зондов-пенетраторов [4, 5];
- 4) **«Возврат»** – по отбору и доставке образцов грунта АСЗ на Землю (в ряде случаев можно будет осуществить посадку КА на поверхность АСЗ).

Таким образом, околоземное космическое пространство можно будет использовать как своеобразный полигон для изучения свойств АСЗ и отработки средств воздействия на ОНТ с целью отражения угрозы их столкновений с Землей.

**РИС. 3. КА-РАЗВЕДЧИК
С ЗОНДАМИ-ПЕНЕТРАТОРАМИ**



**ПО СОВРЕМЕННЫМ
ПРЕДСТАВЛЕНИЯМ НАИБОЛЕЕ
ВЕРОЯТНЫМИ СРЕДСТВАМИ
ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ МАЛЫМ
АСТЕРОИДАМ СТАНУТ КИНЕТИЧЕСКИЕ
УДАРНИКИ, КРУПНЫМ - ЯДЕРНЫЕ
ВЗРЫВНЫЕ УСТРОЙСТВА**

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ-РАЗВЕДЧИК

Для реализации проекта необходимо создать КА-разведчик, на борту которого должны быть приборы для проведения траекторных измерений, получения изображений и ряд других. В частности, для осуществления эксперимента «Пролет» необходима установка лазерного дальномера и ротационного гравитационного вариометра [6], позволяющего определять плотностную неоднородность и массу ОНТ с погрешностью 5–10% в зависимости от величины относительной скорости сближения (5–75 км/с) и на дальностях 5–50 км.

Для проведения экспериментов «Удар» и «Внедрение» в состав КА предполагается включить зонды-пенетраторы, предназначенные для проникания в грунт и изучения его свойств. В качестве базового образца низкоскоростного (до 80 м/с) пенетратора может быть использован пенетратор, разработанный для экспедиции «Марс-96». Высокоскоростной пенетратор, рассчитанный на внедрение в грунт со скоростями до 2,6 км/с, может быть создан на основе пенетратора для экспедиции «Луна-Глоб» [7]. Он может выдерживать перегрузки при соударении с поверхностью до 10 тысяч единиц.

Основой для создания КА-разведчика может послужить проект КА, представленный в работе [8]. Его масса составит 262 кг, включая бортовую исследовательскую аппаратуру массой 48 кг и два зонда-пенетратора массой по 15 кг. Общий вид КА-разведчика с высокоскоростными зондами-пенетраторами приведен на рис. 3.

Весьма перспективным для запуска КА-разведчиков представляется использование РН «Днепр» – конверсионного варианта стратегической ракеты РС-20 («Воевода»). В случае дооснащения ее разгонным блоком она обеспечит выведение КА не только на околоземные, но и на межпланетные траектории.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Определение свойств пролетающего тела – комплексная задача. Конечной целью является знание тех свойств, которые нужны для расчетно-теоретического предсказания результатов воздействия на тело выбранными средствами. По современным представлениям наиболее вероятными средствами противодействия малым телам будут кинетические ударники, крупным телам – ядерные взрывные

ИЗ-ЗА ТРУДНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ
ОБРАЗЦОВ АСТЕРОИДОВ ДЛЯ
ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ
ПРИДЕТСЯ ОБРАЩАТЬСЯ
К ОБРАЗЦАМ-АНАЛОГАМ,
НАКОПЛЕННЫМ ПРИ ПАДЕНИЯХ
МЕТЕОРИТОВ

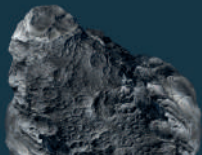
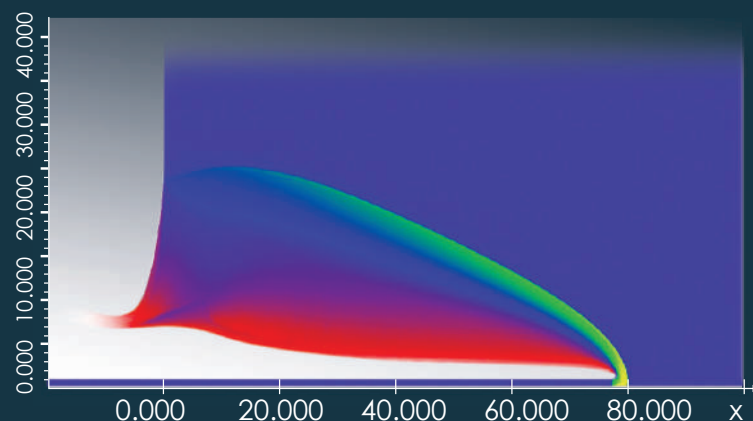


РИС. 4. ПРОНИКАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ
В ПОРОДУ



устройства. Для надежного прогнозирования результатов воздействия необходимо знание локальных свойств пород (в каждой точке объекта) и обобщенных, характеризующих укрупненную структуру тела. К локальным свойствам относятся данные о сжимаемости и разгрузке, которые систематизируются в виде уравнений состояния пород, упругие и прочностные характеристики пород. При получении локальных свойств ценными являются данные о химическом, оксидном и минералогическом составе пород. Обобщенные свойства отражают наличие неоднородностей (по плотности пород и составу), наличие разломов и пустот.

Ввиду трудностей получения образцов для лабораторных исследований на начальном этапе с необходимостью придется обращаться к образцам-аналогам, накопленным при падениях метеоритов. Именно для подбора аналогов ценными являются данные по химическому, оксидному и минералогическому составу. Эти данные могут быть получены с помощью оптических наблюдений результатов столкновений ударников малой массы с исследуемыми телами. Для изучения распределения плотности вещества могут быть использованы пенетраторы большой длины (5-10 м и более). Определение уравнения состояния, упругих и прочностных характеристик на раннем этапе будет осуществляться по образцам-аналогам, взятым из метеоритов, имеющихся в запасниках. Дополнительно прочностные характеристики будут контролироваться по размерам кратеров, образованных ударниками, а уравнения состояния – по разлету вещества в ударных экспериментах.

Перечислим и прокомментируем предлагаемые методики (в дальнейшем их состав будет расширяться).

1. Оптические измерения. Данная методика позволяет определить геометрию объекта и его размеры, а также при наличии соответствующего оборудования дает возможность определять спектральный состав излучения вещества, разогретого при ударе.

2. Гравиметрия. Методика позволяет определить массу тела вдоль траектории пролета, что в совокупности с геометрическими данными дает возможность определить усредненную плотность вещества. С помощью гравиметрии можно также обнаружить местонахождение разломов и оценить пористость.

3. Воздействие на объект с помощью ударников. В качестве ударника могут выступать, например, металлические шары. Удар таким телом приводит к образованию кратера. С помощью математического моделирования рассчитывается весь процесс образования кратера. Такие расчеты достаточно хорошо откалиброваны. Окончательные форма и глубина кратера определяются значением прочности, которая необходима для решения задач разрушения тела. Дополнительный интерес представляет оценка прочности тела в зависимости от масштаба взаимодействия. Поэтому предполагается серия из трех-четырех ударников для проверки влияния масштабного эффекта.

Помимо оптических наблюдений общей картины развития явления удара большую ценность представляют оптические измерения в разных спектральных диапазонах. По горячей части

РИС. 5. ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ВЫДЕЛЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГРУНТА НА ФОНЕ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО РАЗМЕРА КРАТЕРА (В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ)

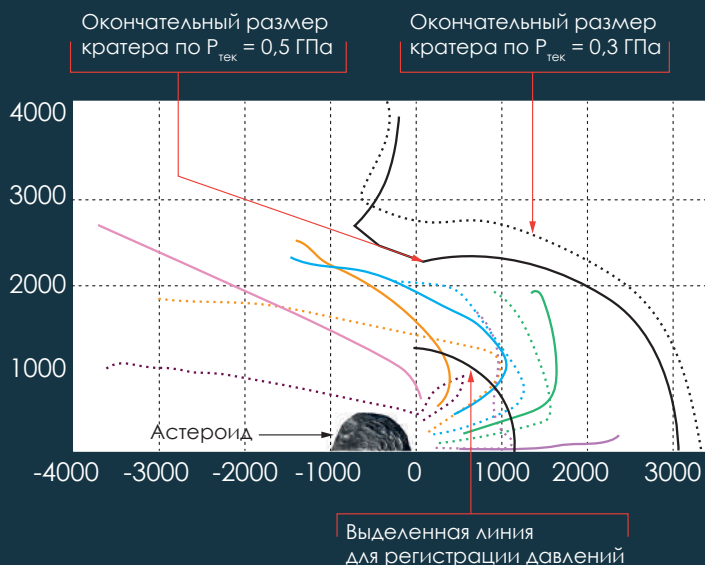
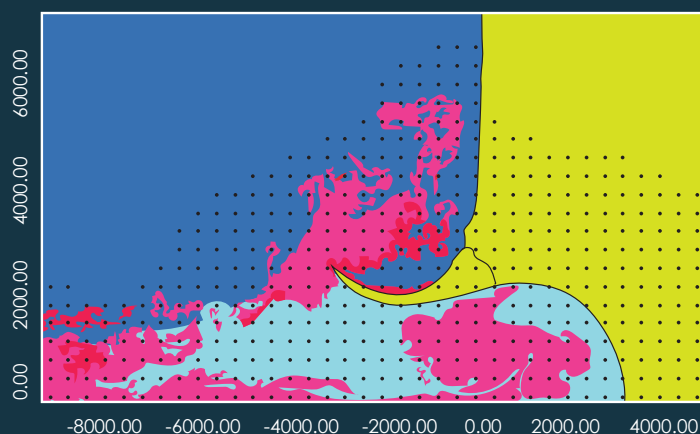


РИС. 6. ПОЛЯ ОБЛАСТЕЙ И ВЕКТОРЫ СКОРОСТЕЙ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ КРАТЕРА



спектра определяется поэлементный состав вещества, по холодной – минеральный состав.

Планируется использовать также технологию проникания металлического стержня в грунт. Скорость проникания будет существенно зависеть от плотности грунта. По ходу проникания измеряется расход (длина) стержня во времени. Изменения скорости расхода будут обусловлены изменением плотности. Математическое моделирование позволит рассчитать весь процесс образования каверны и в этом случае (см. рис. 4).

На рис. 5 представлены схемы образования кратера, траектории движения выделенных элементов грунта и размеры в зависимости от прочности в случае удара сферическим телом. На рис. 6 – поля расчетных областей и векторы скоростей при образовании кратера.

ВЫВОДЫ

1. Рост числа обнаруженных АСЗ открывает возможности для организации многоцелевых экспедиций к ним при их пролетах в околоземном космическом пространстве.
2. В ходе этих многоцелевых экспедиций возможно проведение широкого спектра экспериментов как по изучению АСЗ дистанционными и прямыми (контактными) методами, включая доставку образцов грунта на Землю, так и одновременно по отработке методов и средств системы планетарной защиты.
3. При проведении ударных экспериментов, в частности с применением зондов-пенетраторов, могут быть обеспечены скорости соударения от десятков метров в секунду до десятков километров в секунду.
4. Экспериментальные программы, включающие эксперименты с ударниками, пенетраторами, оптическими средствами и гравиметрией, в совокупности с накопленными данными по метеоритам дадут возможность определять локальные и обобщенные свойства малых тел, необходимые для предотвращения катастрофических последствий в случае сближения их с Землей по столкновительной орбите.
5. Осуществление многоцелевых экспедиций к пролетающим вблизи Земли астероидам существенно сократит сроки, снизит стоимость и повысит эффективность проведения космических экспедиций к малым небесным телам и послужит отработке средств планетарной защиты.



Литература

1. Kovtunenکو V., Rogovsky G., Chesnokov A., Sukhanov K., Papkov O., Bojor Ju., Zaitsev A., Kotin V., Magli-
nov I., Feshin I. (1995). Space Patrol Project as a First Stage of the Earth Asteroid Protection System Deploy-
ment. IAF-95-Q.5.09. 10 p., ill.
2. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html> (Дата обращения: 17.04.2018).
3. **Меньшиков В.** Байконур // *Авиация и космонавтика*. 1993. N 4. С. 8.
4. **Петров Д. В., Симоненко В. А., Шубин О. Н.** Способы экспериментального исследования свойств
астероидов при космических миссиях // *Известия Челябинского научного центра*. 1997. Космическая
защита Земли. Специальный выпуск. С. 4.
5. **Zaitsev A. V., Dobrov A. V., Kotin V. A., Simonov I. V.** Impact experiment for project Space Patrol. *International
Journal of Impact Engineering*, 1997. Vol. 20. Proceedings of the 1996 Hypervelocity Impact Symposium,
pp. 839–848.
6. **Сорока А. И.** Гравитационно-градиентные методы исследования плотностной неоднородности
космических тел естественного и искусственного происхождения // *Околоземная астрономия и проблемы
изучения малых тел солнечной системы*. Сб. научн. трудов конференции (г. Обнинск, 25–29 октября 1999 г.).
М.: Косминформ, 2000. С. 308–318.
7. **Галимов Э. М.** Космические исследования в ГЕОХИ имени В. И. Вернадского. Достижения, проблемы,
перспективы [Электронный ресурс]. URL: <http://testpilot.ru/espace/bibl/ziv/1999/6/geohi.html> (Дата
обращения: 17.04.2018).
8. **Asushkin V. A., Ishin S. V., Pichkhadze K. M., Tikhonov V. A., Vlasenko O V., Zaitsev A. V.** (2005) Some Issues
on Development of Space Defense Facilities Against Asteroids and Comets. Proceedings of European Conference
For Aerospace Sciences (EUCASS). 2005. CD, EUCASS, 2.01.04.

References

1. Kovtunenکو V., Rogovsky G., Chesnokov A., Sukhanov K., Papkov O., Bojor Ju., Zaitsev A., Kotin V., Magli-
nov I., Feshin I. (1995). Space Patrol Project as a First Stage of the Earth Asteroid Protection System Deploy-
ment. IAF-95-Q.5.09. 10 p., ill.
2. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html> (Retrieval date: 17.04.2018).
3. **Men'shikov V.** Baykonur. Aviatsiya i kosmonavtika, 1993, No 4, P. 8.
4. **Petrov D.V., Simonenko V.A., Shubin O.N.** Sposoby eksperimental'nogo issledovaniya svoystv asteroidov pri
kosmicheskikh missiyakh. Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra, 1997. Kosmicheskaya zashchita Zemli.
Spetsial'nyy vypusk, p. 4.
5. **Zaitsev A. V., Dobrov A. V., Kotin V. A., Simonov I. V.** Impact experiment for project Space Patrol. *International
Journal of Impact Engineering*, 1997. Vol. 20. Proceedings of the 1996 Hypervelocity Impact Symposium, pp.
839–848.
6. **Soroka A.I.** Gravitatsionno-gradiyentnye metody issledovaniya plotnostnoy neodnorodnosti kosmicheskikh tel
estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya. Okolozemnaya astronomiya i problemy izucheniya malykh tel
solnechnoy sistemy (Obninsk, October 25–29, 1999). Moscow, Kosminform, 2000, pp. 308–318.
7. **Galimov E.M.** Kosmicheskije issledovaniya v GEOKhI imeni V.I. Vernad'skogo. Dostizheniya, problemy, perspek-
tivy. Available at: <http://testpilot.ru/espace/bibl/ziv/1999/6/geohi.html> (Retrieval date: 17.04.2018).
8. **Asushkin V. A., Ishin S. V., Pichkhadze K. M., Tikhonov V. A., Vlasenko O V., Zaitsev A. V.** (2005) Some Issues
on Development of Space Defense Facilities Against Asteroids and Comets. Proceedings of European Conference
for Aerospace Sciences (EUCASS). 2005. CD, EUCASS, 2.01.04.

© Зайцев А. В., Петров Д. В., Ногин В. Н., Елсуков В. П.,
Краснослабодцев Д. А., Симоненко В. А., Сорока А. И., 2018

История статьи:

Поступила в редакцию: 23.04.2018

Принята к публикации: 07.05.2018

Модератор: Бурдакова Т. В.

Конфликт интересов: отсутствует

Для цитирования:

Зайцев А. В., Петров Д. В., Ногин В. Н., Елсуков В. П., Краснослабодцев Д. А., Симоненко В. А., Сорока А. И.
Многоцелевые экспедиции к астероидам, пролетающим вблизи Земли // Воздушно-космическая сфера.
2018. №2(95). С. 22–29.