ВЕСТНИК РФФИ

№ 3 (79) июль–сентябрь 2013 года

Основан в 1994 году

Зарегистрирован Комитетом РФ по печати,
рег. № 012620 от 03.06.1994 г.

Учредитель
федеральное государственное бюджетное учреждение
«Российский фонд фундаментальных исследований»

Главная редакция:

главный редактор В.Я. Панченко,
заместитель главного редактора В.В. Квардаков,
приглашенный редактор Ю.Ю. Балега

Редакционная коллегия:

В.А. Геловани, Ю.Н. Кульчин, В.П. Матвеенко, Е.И. Моисеев,
А.М. Музафаров, А.С. Сигов, Р.В. Петров, И.Б. Федоров, В.В. Ярмолюк,
П.П. Пашинин, Е.Н. Черных, В.А. Шахнов

Редакция:

В.И. Елисеев, А.П. Локтев, А.О. Тимофеева

Адрес редакции:

119991, Москва, Ленинский проспект, 32а
Тел.: (495) 952 6053, факс: (495) 952 5541
e-mail: pressa@rfbr.ru

© Российский фонд фундаментальных исследований, 2013.

JOURNAL RFBR

Number 3 (79) July-September 2013

Founded in 1994

Registered by the Committee of the Russian Federation for Printed Media,
reg. Number 012620 of 03.06.1994

The Founder
Federal State Institution
«Russian Foundation for Basic Research»

Editor-in-Chief V. Panchenko,
Deputy chief editor V. Kvardakov,
Guest Editor Yu. Balega

Editorial Board:

V. Gelovani, J. Kul'chin, V. Matveenko, E. Moiseev,
A. Muzafarov, A. Sigov, R. Petrov, I. Fedorov, V. Yarmolyuk,
P. Pashinin, E. Chernykh, V. Shakhnov

Editorial:

V. Eliseev, A. Loktev, A.Timofeeva

Editorial address:

119991, Moscow, Leninsky Prospect, 32a
Tel.: (495) 952 6053, fax: (495) 952 5541
e-mail: pressa@rfbr.ru

© Russian Foundation for Basic Research, 2013.

«Вестник РФФИ»
№3 (79) июль-сентябрь 2013 г. (Приложение к «Информационному бюллетеню» № 21)

ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК, ПОСВЯЩЕННЫЙ УГРОЖАЮЩИМ ЯВЛЕНИЯМ, КОСМИЧЕСКИМ И ЗЕМНЫМ

О редакторе тематического блока члене-корреспонденте Ю.Ю. Балеге 6

Балега Ю.Ю.
Аннотация к тематическому блоку.....7

Маров М.Я., Шустов Б.М.
Метеорит «Челябинск»: основные характеристики падения.....11

Ахметшин Р.З., Ефимов Г.Б., Энеев Т.М.
Оптический барьер в схеме космического патруля.....15

Мушаилов Б.Р.
Космическая угроза. Стратегия выживания.....18

Шувалов В.В., Артемьева Н.А.
Физические явления при падении небольших космических тел на Землю и их моделирование.....26

Бескин Г.М., Карпов С.В., Плохотниченко В.Л., Бондарь С.Ф., Перков А.В., Иванов Е.А., Каткова Е.В., Сасюк В., Шерер Э.
Широкоугольный оптический мониторинг высокого временного разрешения как способ обнаружения опасных космических объектов.....34

Рыхлова Л.В., Баканас Е.С., Барабанов С.И., Бусарев В.В.
Получение физических характеристик избранных астероидов, сближающихся с землей.....43

ВЫБОР МОЛОДЫХ

Ершов В.В.

О грязевых вулканах и не только.....46

"RFBR Journal"
No 3 (79), July–September 2013 (Supplement to RFBR "Information Bulletin" No 21)

THEMATIC SECTION DEVOTED TO THE THREATENING PHENOMENA IN SPACE AND ON THE EARTH

About the Editor of the Thematic Section RAS Corresponding Member Yu. Balega.....6

Yu. Balega
Abstract of the Thematic Section.....7

Marov M., Shustov B.
Meteorite "Chelyabinsk": Main Characteristics of the Fall.....11

Akhmetshin R., Efimov G., Eneev T.
The Optical Barrier in Space Patrol Scheme.....15

Mushailov B.
Cosmic Threat. The Strategy of Survival.....18

Shuvalov V., Artemieva N.
Physical Phenomena Caused by the Fall of Small Space Bodies onto the Earth and their Modelling.....26

Beskin G., Karpov S., Plokhotnichenko V., Bondar S., Perkov A., Ivanov E., Katkova E., Sasyuk V., Shearer A.
Wide-Field Optical Monitoring with High Temporal Resolution as a Method to Detect Space Hazards.....34

Rykhlova L., Bakanas E., Barabanov S., Busarev V.
Characterisation of Physical Properties of Selected NEAs.....43

YOUNG RESEARCHERS' CHOICE

Ershov V.
About the Mud Volcanoes and not Only….....46

О редакторе тематического блока члене-корреспонденте РАН Юрии Юрьевиче Балеге

Член-корреспондент РАН,
Директор Специальной астрофизической обсерватории РАН.

Лауреат Государственной премии СССР 1991 г.,
лауреат Премии Правительства РФ 2011 г.

Автор более 250 научных работ.

БАЛЕГА Юрий Юрьевич

Ю.Ю. Балега – один из основателей оптической интерферометрии на телескопах с большими диаметрами зеркал. Им созданы новые средства и методы регистрации и обработки астрономических изображений, позволяющие в условиях искажений, вызванных атмосферной турбулентностью, получать изображения космических объектов с разрешением, определяемым дифракцией на апертуре. При его участии были разработаны и долгое время являлись основными средствами регистрации слабых изображений в телескопе телевизионные приемники, работающие в режиме счета отдельных квантов света, а в дальнейшем – новые быстродействующие ПЗС-приемники.

Основные научные интересы связаны с изучением физических свойств двойных и кратных звездных систем, а также с исследованием звезд на поздних стадиях эволюции. Ю.Ю. Балега – президент комиссии «Двойные и кратные звезды» Международного астрономического союза. Он также член бюро Отделения физических наук РАН, член Совета РФФИ и заместитель председателя Южного научного центра РАН.

Под руководством Ю.Ю. Балеги в Специальной астрофизической обсерватории РАН на главных астрономических инструментах нашей страны – оптическом 6-метровом телескопе БТА и радиотелескопе РАТАН-600 в течение двух десятилетий выполнено около 2 тыс. научных программ отечественных и зарубежных ученых. Сами телескопы обсерватории постоянно модернизируются и находятся в ряду лучших астрономических инструментов мира.

Ю.Ю. Балега удостоен ряда государственных наград СССР и России. Он в течение многих лет является президентом научного общества Карачаево-Черкесской Республики, депутатом Парламента Карачаево-Черкесской Республики и председателем общественного совета при Росприроднадзоре по Северо-Кавказскому федеральному округу.

Аннотация к тематическому блоку

Балега Ю.Ю.

К концу XX в. в России и в мире в силу развития процессов глобализации значительно возросло внимание к глобальным опасностям, угрожающим существованию человечества, климатическим, экологическим, социальным. В этом ряду находится и проблема предохранения Земли от космических угроз. И если нет реальных возможностей защитить человечество от близкого взрыва сверхновой, то астероидно-кометная опасность прогнозируема и в принципе поддается предотвращению. За последнее десятилетие этой тематике посвящены сотни статей и около десятка монографий. Интерес к ней резко возрос в связи со взрывом в атмосфере 15 февраля 2013 г. в окрестностях Челябинска метеороида размером около 20 м. Такого рода тело в отличие от крупных (> 100 м) астероидов и комет очень трудно обнаруживать на больших расстояниях от Земли – на данный момент известно лишь 90% объектов этой категории. Исследования в рамках проблемы астероидно-кометной опасности имеют комплексный характер. Здесь и проведение оптических наблюдений по обнаружению новых угрожающих тел, и точная астрометрия для прогнозирования их поведения, и определение их физических свойств, и оценки вероятности столкновения с Землей, и моделирование последствий этих столкновений, и разработка приборов для обнаружения и исследования космических угроз.

В настоящем сборнике представлены результаты исследований лишь в рамках небольшой части этих направлений, которые были поддержаны РФФИ.

Работа Б.Р. Мушаилова «Космическая угроза. Стратегия выживания» посвящена классификации различных астероидов (метеороидов) и комет с точки зрения последствий столкновения их с Землей. В ней отмечено, что влияние на биосферу кометного вещества существенно значительнее такового для астероидов из-за его большего рассеивания в атмосфере. Приведены примеры близких к Земле пролетов как крупных, так и мелких астероидов (метеороидов), рассмотрены эффекты падения таких тел в океан, оценены параметры волн, порождаемых ими. Предложена новая (спорная!) концепция противодействия последствиям столкновения, приведшего к глобальной катастрофе, в основу которой положено создание автономных планетных поселений, обеспечивающих выживание и развитие человечества после катастрофы.

В статье В.В. Шувалова и Н.А. Артемьевой «Физические явления при падении небольших космических тел на Землю и их моделирование» описаны физические процессы при входе в атмосферу Земли (торможение, абляция, фрагментация) и современные численные методы их моделирования. Рассмотрены два принципиально разных сценария входа в атмосферу малых (менее 10 м) и больших (десятки метров и более) тел. Разрушение первых обычно начинается на высоте 40–50 км. Отдельные фрагменты быстро разлетаются, суммарная площадь поперечного сечения увеличивается, энергии воздуху передается больше, внешне это выглядит как вспышка. Мелкие фрагменты быстро тормозятся, один или несколько более крупных продолжают движение, пока не произойдет новое разрушение (из-за того, что плотность воздуха и аэродинамические нагрузки все время увеличиваются) и новая вспышка. После нескольких разрушений и вспышек все фрагменты тормозятся. Детально описать движение такого метеороида (например, Челябинского болида) теоретически практически невозможно потому, что моменты разрушений и количество и размеры образующихся кусков сильно зависят от индивидуальных особенностей начального тела. Однако с помощью метода Монте-Карло удается воспроизводить уже случившиеся события. Крупные тела успевают испытать много разрушений до того, как образующиеся фрагменты заметно разлетятся. При этом количество разрушений и их характеристики не важны. В любом случае к моменту, когда тело начнет сильно деформироваться, оно уже будет полностью раздроблено, т.е. может рассматриваться как жидкое. Модели же движения в атмосфере таких квазижидких тел разработаны и были с успехом при-

менены к описанию Тунгусской катастрофы. Взаимодействие с атмосферой тела размером порядка 80 м приводит к эффектам, наблюдавшимся при падении Тунгусского космического тела: вывалу леса, образованию массивного мезосферного облака, состоящего из частицы космического вещества и льда. Челябинский метеороид был примерно в 4–5 раз меньше, но ударная волна, дошедшая до поверхности, оказалась достаточно сильной, чтобы выбить стекла на площади порядка 2000 км^2. По-видимому, тела размером порядка 10–100 м являются наиболее опасными для современного человечества: они многочисленны, но их трудно обнаружить; не достигая поверхности земли, они, тем не менее, могут нанести большой ущерб при попадании в густонаселенные районы.

Работа М.Я. Марова и Б.М. Шустова «Метеорит «Челябинск»: основные характеристики падения» посвящена анализу падения метеорита в районе Челябинска с точки зрения астрономии. Проанализированы основные наблюдательные факты, характеристики входа, включая размеры, скорость входа, высоту взрыва и энерговыделение. Из-за столь его высокой скорости, почти вдвое превышающей вторую космическую, и малой высоты над горизонтом сближение с Землей метеорного тела достаточно внушительных размеров прошло незамеченным всеми существующими средствами космического и наземного наблюдения за небесными и искусственными телами. К тому же оно приближалось к Земле с дневной стороны, с направления, очень близкого к направлению на Солнце, из-за чего не могло быть замеченным с Земли. И только после его вторжения в атмосферу это событие привлекло к себе столь большое внимание. При взаимодействии с атмосферой появилось сильное свечение (явление, называемое болидом). Примерно через 35 секунд произошла мощная вспышка, длительностью 1–2 секунды. Приводится краткое описание аэродинамических явлений, сопровождающих вторжение в атмосферу тел с гиперзвуковой скоростью и формирование ударной волны, ответственной за произведенные разрушения на поверхности. Приведены оценки частоты падения небесных тел в зависимости от их размера, а также последствий этих столкновений с Землей. Подчеркнуто, что изучение малых тел Солнечной системы призвано дать ответ на фундаментальные вопросы, связанные с происхождением протопланетного диска и процесса образования планет. Изучение малых тел, к которым относится Челябинское событие, напрямую связано также с проблемой астероидно-кометной опасности (АКО). Приведены размеры потенциально опасных небесных тел, для наблюдения которых необходимо создание наземных специализированных телескопов для предупреждения о событиях АКО, а также развертывание систем космического базирования для обнаружения и мониторинга таких тел в околоземном космическом пространстве.

В статье Р.З. Ахметшина, Г.Б. Ефимова и Т.М. Энеева «Оптический барьер в схеме космического патруля» рассмотрена схема космического патруля, которая предполагает создание «оптического барьера» с помощью телескопов на космических аппаратах (КА), размещенных на гелиоцентрической орбите. В его задачу входят обнаружение новых космических объектов (КО), сближающихся с Землей, оценка их опасности и каталогизация, в первую очередь, потенциально опасных КО (приближающихся к земной орбите на расстояние менее 0,05 а.е.). Под «оптическим барьером» подразумевается постоянный мониторинг телескопами окрестности Земной орбиты, представляющей собой тор толщиной 0,1 а.е. Эта область должна сканироваться телескопами 4 раза за сутки, для получения 4-х положений каждого вновь обнаруживаемого КО, для оценки параметров его орбиты и степени его опасности. Для уточнения орбит КО необходимы дополнительные наблюдения, то есть, их последующее «сопровождение». Даны оценки необходимых характеристик телескопов, характеристик оптического барьера, минимальных размеров обнаруживаемых потенциально опасных КО и их количества при различных орбитах размещения КА патруля.

Целью работы Л.В. Рыхловой, Е.С. Баканас, С.И. Барабанова и В.В. Бусарева «Получение физических характеристик избранных астероидов, сближающихся с Землей» является определение параметров некоторых астероидов по данным многоцветной фотометрии и спектроскопии низкого разрешения. На 1-м телескопе НИИ КрАО была выполнена высокоточная фотометрия избранных астероидов, сближающихся с орбитой Земли. На 2-м телескопе на п. Терскол в КБР проведена спектрометрия низкого разрешения

для двух астероидов, сближающихся с орбитой Земли, и пяти астероидов Главного пояса. По разработанной в ИНАСАН методике обработки и анализа наблюдений были получены следующие характеристики наблюдаемых астероидов: абсолютные звездные величины в фильтрах BVRI, разности цвета B-V, V-R, R-I, геометрическое альбедо в диапазоне длин волн используемых фильтров, размеры астероидов, периоды их вращения вокруг собственной оси, спектральные классы и оценка масс. В статье приводятся полученные результаты для астероидов: 330825 (2008 XE3), 141018 (2001 WC47) and 312473 (2008 SX245). По полученным спектрам низкого разрешения определялись спектральные классы исследованных астероидов, отличия от модельных спектров заданных спектральных классов для выявления особенностей минералогического состава вещества поверхности астероидов, а также для поиска аналогов среди астероидов, сближающихся с орбитой Земли, и найденных на Земле образцов метеоритов. Приведены результаты исследований для следующих астероидов: Pomona (32), 145 Adeona, 704 Interamnia, 779 Nina, 330825 (2008 XE3) and 2012 QG42. После Челябинского события 14 февраля 2013 г. был проведен поиск связей определенной по видеонаблюдениям орбиты болида с другими орбитами малых тел Солнечной системы и обнаружен метеорный рой, связанный с орбитой Челябинского болида.

Возможности малых оптических телескопов с приемниками высокого временного разрешения для обнаружения быстродвижущихся опасных космических тел обсуждаются в работе Г. Бескина и др. «Широкоугольный оптический мониторинг высокого временного разрешения как способ обнаружения опасных космических объектов». В ней предлагается использовать многоканальные оптические системы с приемниками субсекундного временного разрешения для обнаружения и изучения опасных космических тел естественного и искусственного происхождения. Сконструированы два инструмента Мини-МегаТОРТОРА (с 6-ю и 9-ю объективами), функционирующие в двух режимах: мониторинговом (поля зрения 600 и 900 кв.градус) и исследовательском (поле зрения – 100 кв.градусов). Во втором режиме все объективы ориентированы на одно поле, в котором находится обнаруженный при мониторинге быстродвижущийся объект. Смена поля зрения за доли секунды обеспечивается поворотами плоских зеркал, расположенных перед объективами, а измерение цвета и поляризации – набором BVR фильтров и поляроидов. Приводятся некоторые детали конструкции приборов, их характеристики, параметры обнаруживаемых объектов. В частности, одиночный канал имеет поле зрения около 100 кв.градусов, а системы ММТ-6 и ММТ-9 в широкопольном мониторинговом режиме – около 600 и 900 кв.градусов, соответственно. Пределы обнаружения в B-полосе составляют для ММТ-6 –11,5 зв.вел. за 0,13 с (14 и 16,5 зв.вел. за 13 и 1300 с), а для ММТ-9 – 12 зв.вел. за 0,1 с (14,5 и 17 зв.вел за 10 и 1000 с). В исследовательском (follow-up) режиме узкого поля при наблюдениях отдельных объектов размер поля зрения уменьшается до 100 кв.градусов, а предельная звездная величина зависит от выбора комбинации спектральных и поляризационных фильтров и лежит в диапазоне 10,5–13,5 зв.вел. за 0,13 или 0,1 с, достигая 18 зв.вел. за 1000–1300 с. Основываясь на оценке параметров Челябинского метеорита, была получена зависимость блеска объекта от времени подлета к Земле. В итоге оказалось, что сталкивающийся с Землей метеороид может быть обнаружен на расстоянии до 1 млн км при экспозиции 1000 с и до 100 тыс. км при экспозиции 0,1 с; при этом время с момента обнаружения до входа в атмосферу лежит в диапазоне от получаса до недели в зависимости от того, направлена скорость объекта навстречу движению Земли или его движение является догоняющим. В качестве развития сис-тем такого типа рассматривается проект комплекса из нескольких сотен телескопов диаметром 40 см и полем зрения 1 кв.градус.

Опасными для земной цивилизации могут быть не только космические объекты, но и земные явления: землетрясения, цунами, извержения вулканов. Особое место в этом перечне принадлежит грязевым вулканам, – их изучению и была посвящена стажировка молодого ученого В.В. Ершова в Институте физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, чей отчет приведен в настоящем сборнике.

Грязевой вулкан – это, несомненно, междисциплинарный объект исследования, требующий соответствующего комплексного рассмотрения. При изучении

грязевого вулканизма рассматривается ряд важных проблем, имеющих прикладное и фундаментальное значение. К ним относятся, прежде всего, связь грязевого вулканизма с нефтегазоносностью, вклад грязевулканических газов в общий баланс парниковых газов в атмосфере, а также связь деятельности грязевых вулканов с региональной сейсмичностью. Катастрофические извержения грязевых вулканов могут оказывать существенное воздействие на окружающую среду. Так, например, в 2006 г. в Индонезии произошло известное извержение вулкана LUSI, которое нанесло региону огромный экономический ущерб. Подводные грязевые вулканы часто располагаются на континентальных шельфах, поэтому даже относительно слабые извержения могут вызывать разрушения прибрежной инфраструктуры (кабельных каналов связи, нефтегазопроводов и др.) и затруднять навигацию в прибрежных водах. В связи с этим очень важно иметь корректные оценки пространственно-временных масштабов извержений грязевых вулканов. По итогам выполненной работы можно сделать следующий общий вывод. Оценки глубины залегания грязевулканических резервуаров и корней грязевых вулканов, полученные по различным данным, показывают хорошее соответствие между собой для каждого из рассматриваемых вулканов. Соответственно математическая модель описания движения геофлюидов в грязевулканических структурах является адекватной и может быть использована для дальнейших расчетов по данной проблематике.

Метеорит «Челябинск»: основные характеристики падения *

Маров М.Я., Шустов Б.М.

Рассматривается падение метеорита в районе Челябинска с точки зрения астрономии. Проанализированы основные наблюдательные факты, характеристики входа, включая размеры, скорость входа, высоту взрыва и энерговыделение. Приводится краткое описание аэродинамических явлений, сопровождающих вторжение в атмосферу тел с гиперзвуковой скоростью и формирование ударной волны, ответственной за произведенные разрушения на поверхности. Приведены оценки частоты падения небесных тел в зависимости от их размера, а также последствий этих столкновений с Землей. Подчеркнуто, что изучение малых тел Солнечной системы призвано дать ответ на фундаментальные вопросы, связанные с происхождением протопланетного диска и процесса образования планет. Изучение малых тел, к которым относится Челябинское событие, напрямую связано также с проблемой астероидно-кометной опасности (АКО). Приведены размеры потенциально опасных небесных тел, для наблюдения которых необходимо создание наземных специализированных телескопов для предупреждения о событиях АКО, а также развертывание систем космического базирования для обнаружения и мониторинга таких тел в околоземном космическом пространстве.

Ключевые слова: астрономия, метеорит, взрыв, ударная волна, формирование планет, астероидно-кометная опасность (АКО).

* *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00478-а)*

Основные характеристики падения

Упавший в районе Челябинска метеорит стал крупным событием, так как его падение произошло в довольно густо населенном районе и сопровождалось целым рядом зрелищных эффектов и разрушений. Поэтому это в общем-то рядовое астрономическое явление привлекло к себе большое внимание. Сам этот факт стал убедительным свидетельством того, что Земля не существует изолированно в космосе, а находится в окружении огромного количества тел различного размера: астероидов и метеороидов – периодически сталкивающихся с **Землей**, а также с **Луной** и другими планетами, что хорошо видно на их сильно кратерированных поверхностях. С другой стороны, этот фрагмент более крупного тела принес важную научную информацию о составе вещества, из которого сложены небесные тела в Солнечной системе, и истории их формирования, пополнив обширные коллекции метеоритов различных петрологических классов, найденных в разных районах нашей планеты. Их детальное изучение имеет ключевое значение для ответа на фундаментальные вопросы, связанные с происхождением и ранней эволюцией Солнечной системы на междисциплинарной основе. В работе [1] представлены и проанализированы основные факты о Челябинском событии, на основе которых ниже приведены предварительные астрономические и геохимические сведения.

Утром 15 февраля, примерно в 9:20 местного времени в районе г. Челябинска (Россия) в атмосферу Земли вошло довольно крупное тело (метеороид), размер которого оценивается величиной 12–17 м. Оно вошло в атмосферу под углом ~14 градусов к горизонту со скоростью ~18 км/с. Из-за столь высокой скорости, почти вдвое превышающей вторую космическую, и низкого положения над горизонтом сближение с Землей метеорного тела достаточно внушительных размеров прошло незамеченным всеми существующими средствами космического и наземного наблюдения за небесными и искусственными телами. К тому же он приближался Земле с дневной стороны, направления, очень близкого к направлению на Солнце, чтобы быть замеченным с Земли. И только после его вторжения в атмосферу это событие привлекло к себе столь большое внимание. При взаимодействии с атмосферой появи-

МАРОВ Михаил Яковлевич
академик, заведующий отделением Института геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН.

ШУСТОВ Борис Михайлович
член-корреспондент РАН, директор ИНАСАН.

лось сильное свечение (явление, называемое болидом). Примерно через 35 секунд произошла мощная вспышка, длительностью 1–2 секунды.

Анализ наземных фотографий позволил оценить высоту основной вспышки, обусловленной выделением энергии взрыва, в 22,5 ± 1,6 км. Вершина облака, вызванного взрывом, поднялась из-за конвекции на 12 км примерно за 100 секунд, что дает оценку максимальной вертикальной скорости в 110–120 м/с. Расчеты показали, что верхняя часть шлейфа, испытывающая сильный ветровой снос, имеет высоту в 57 км и расположена в мезосфере [2]. Была построена световая кривая, которая показывает множественность вспышек болида. По сообщениям очевидцев, в момент основной вспышки свечение было много ярче солнечного, ощущался жар. И до вспышки, и после нее в небе был хорошо виден инверсионный след. Через несколько минут (по свидетельствам очевидцев, от 77 секунд до трех минут и более, в зависимости от расстояния) на землю пришла ударная волна. Полоса воздействия ударной волны на поверхности составила около 130 км в длину и 50 км в ширину. Взрыв произошел над густонаселенной местностью на высоте 23 км. От последствий взрыва, мощность которого оценивается величиной 300–500 кт ТНТ, пострадало около полутора тысяч человек, главным образом, из-за порезов стеклами выбитых окон. Моделирование зон поражения ударной волной при ударах каменных метеоритов показало, что тела размером менее 30 м не производят разрушений зданий.

Среди каменных тел, падающих вертикально, наиболее эффективными с точки зрения разрушений ударной волной оказываются тела размером около 50 м [3]. Тем не менее, по числу пострадавших падение этого метеорита размером около 20 м не имеет аналогов.

Анализ комплекса физических процессов, связанных со взрывом Челябинского болида, показал, что его прохождение через атмосферу сопровождается их интенсивным аэродинамическим разрушением и поперечным растеканием под действием градиента давления на лобовой поверхности метеороида. Эти процессы завершились резким аэродинамическим торможением и «мгновенным» превращением кинетической энергии метеороида в тепловую энергию частиц самого тела и атмосферы в сравнительно очень тонком слое, во «взрывной» зоне, с генерацией здесь высоких температур и ударной волны [4].

На территории в несколько десятков квадратных километров было найдено множество мелких и небольших (не более 2 кг) осколков метеорита, хотя зона рассеяния фрагментов значительно больше, и вероятно предстоят еще многочисленные находки, после того как сойдет снег. Экспедиции, организованные в первые же дни после падения институтами РАН – Института геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского (ГЕОХИ РАН), Института астрономии (ИНАСАН), Института динамики геосфер (ИДГ РАН) и Уральским федеральным университетом (УрФУ) позволили собрать определенное количество образцов метеорита, на основе которых специалистами лабораторий ГЕОХИ РАН были выполнены анализы элементного, минералогического и изотопного состава, позволившие определить класс метеорита и его петрологический тип [5]. На основе обработки многочисленных видеоданных была установлена траектория движения, а на основе сравнения моментов максимальной световой вспышки и начала разрушений были получены оценки высоты h, на которой происходило наиболее интенсивное разрушение космического тела. Из обработки 4 видеоснимков с наименьшим временем запаздывания ударной волны, сделанных в Первомайском, Еманжелинске и Коркино, в приближении сферической ударной волны, распространяющейся со скоростью 300 м/с, получено значение h=22,9±0,2 км. При этом эпицентр взрыва находился вблизи Первомайского. Если добавить видеоданные с более удаленных регистраций в Челябинске, то h=23,9±1,4 км. Если же эти оценки проводить в приближении цилиндрической волны, то h=23,0 км вблизи Первомайского и h=24,9±0,4 км для энерговыделения тела, происходящего приблизительно в 8 км восточнее. Очевидно, что эти оценки являются предварительными, более точные данные можно будет получить, когда будет уточнена орбита данного тела. На данный момент наиболее точные предварительные оценки орбиты Челябинского метеороида получены в работах [5–7], которые суммированы в таблице, заимствованной нами из [1].

Как видим, результаты разных авторов существенно различаются

по нескольким параметрам, прежде всего, по вероятным значениям большой полуоси и аргумента перигелия. Предварительное определение орбиты челябинского метеорита до сближения с Землей в ИНАСАН дало значения большой полуоси a=1,77 а.е., перигелийного расстояния q=0,75 а.е. и наклона орбиты i=4,3 градуса. Более точные определения орбиты можно будет сделать путем привязки видеозаписей с траекторией полета на основании проведенной сотрудниками ИДГ и ИНАСАН съемки ночного неба.

Тем не менее, по результатам уже имеющихся оценок можно сделать однозначный вывод о принадлежности челябинского тела к семейству группы астероидов, сближающихся с Землей, типа Апполон. К этому следует добавить, что из анализа всех доступных каталогов орбит метеорных тел и базы данных радиометеоров с учетом элементов орбиты согласно [6] был обнаружен метеорный рой, связанный с Челябинским болидом (дневные Пегасо-Аквариды), состоящий из трех ветвей: северной, эклиптикальной и южной [1].

Геохимический анализ привел к выводу, что Челябинский метеорит относится к широко распространенным каменным метеоритам – хондритам химической группы LL и петрологического класса 5. Он содержит тугоплавкие хондры, в нем присутствуют следы ударного и температурного метаморфизма. Ударные нагрузки, вероятно, составили не менее 25-35 GPa, а температура, которую испытало родительское тело в процессе эволюции, – примерно 750–950°С. Таким образом, исходя из существующей классификации, по совокупности проведенных анализов Челябинский метеорит можно характеризовать как обыкновенный хондрит типа LL5/S4-WO [5].

Как уже отмечалось, падение метеороидов, подобных Челябинскому, не такое уж редкое событие. Среди имеющихся данных о подобных событиях можно упомянуть болиды 3 августа 1963 г. (в районе островов Принца Эдуарда, Южная Африка) с оценкой энергии в 260 кт ТНТ, болид Маршаловых островов (1 февраля 1994 г.) с оценкой энергии в 40 кт ТНТ и недавний индонезийский болид (8 октября 2009 г.) с оценкой энергии в 50 кт ТНТ. Последний раз похожее явление на территории России наблюдалось в 2002 г. (Витимский болид 24.09.2002, энергия около 10 кт ТНТ). И все же Челябинское событие следует признать уникальным. Впервые в истории человечества столкновение с крупным небесным телом, хотя и неожиданное, было столь детально задокументировано. Проведен беспрецедентно быстрый и достаточно полный научный анализ события, включая сопровождавшие его эффекты. К ним относятся, в частности, возмущения, вызванные Челябинским болидом, помимо спорадического слоя Es, во всей толще ионосферы, такие как изменение электронной концентрации и высоты слоя F2 (до 2,7 раз в максимуме) на расстояниях до 2000 км, где они сохранялись в течение более 10 часов [9]. В заключение еще раз подчеркнем, что изучение малых тел Солнечной системы: астероидов, комет, метеороидов – это ключ к пониманию процессов химической, тепловой и динамической эволюции протосолнечной туманности и протопланетного диска, процесса образования планет [10]. С ними связаны процессы миграции вещества в Солнечной системе, в том числе переноса летучих, включая появление воды на Земле, и, возможно, процессов зарождения и распространения жизни. Изучение малых тел, к которым относится Челябинское событие, напрямую связано также с проблемой астероиднокометной опасности [11].

Предварительные параметры орбиты Челябинского метеорита

Большая полуось, а,е.	Эксцентриситет	Наклонение, град	Аргумент перигелия, град	Долгота восходящего узла, град	Ссылка на источник
1,73 ± 0,23	0,51 ± 0,08	3,45 ± 2,02	120,62 ± 2,77	326,7 ± 0,79	Zuluaga, Ferrini, 2013
1,55	0,5	3,6	109,7	326,41	Borovicka et al, 2013
1,26 ± 0,05	0,52	2,984	95,5 ± 2	326,5 ± 0,3	Zuluaga, Ferrini, Geens, 2013

Литература

1. ***Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н., Шеляков М.А., Пахомов Ю.В., Шустов Б.М., Шувалов В.В., Бирюков Е.Е., Рыбнов Ю.С., Рыхлова Л.В., Нароенков С.А., Карташова А.П., Харламов В.А., Трубецкая И.А.***
Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. – 2013. – Т. 47, № 4.
2. ***Горькавый Н.Н., Тайдакова Т.А., Проворникова Е.А, Горькавый И.Н., Ахметвалеев М.М.***
Аэрозольный шлейф Челябинского болида // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. – 2013. – Т. 47, № 4.
3. ***Шувалов В.В., Светцов В.В., Трубецкая И.А.***
Оценка размера зоны разрушений, производимых на поверхности Земли ударами астероидов размером 10–300 метров // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. – 2013. – Т. 47, № 4.
4. ***Григорян С.С., Ибодов Ф.С., Ибадов С.И.***
Челябинский суперболид: к физике взрыва // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. – 2013. – Т. 47, № 4.
5. ***Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А. и др.***
Результаты вещественного анализа метеорита «Челябинск» // Геохимия. – 2013. – № 7.
6. ***Zuluaga J.I., Ferrin I.***
A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid (англ.) // arXiv.org. – 2013. –arXiv1302.5377Z – arXiv:1302.5377.
7. ***Zuluaga J.I., Ferrin I., Geens S.***
The orbit of the Chelyab_insk event impactor as reconstructed from amateur and public footage // arXiv.org. – 2013. – arXiv:1303.1796.
8. ***Borovicka J., Spurny P., Shrbeny L.***
Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide // Electronic Telegram /Cambridge, MA: Central Bureau Electronic Telegrams, International Astronomical Union. – 2013. – № 3423.
9. ***Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Алпатов В.В., Григорьева С.А., Журавлев С.В. , Кузнецов В.Д., Кусонский О.А., Лапшин В.Б., Рыбаков М.***
Ионосферные эффекты, стимулированные челябинским метеоритом // Астрономический. Вестник. Исследования Солнечной системы. – 2013. – Т. 47, № 4.
10. ***Маров М.Я.***
Малые тела Солнечной системы и некоторые проблемы космогонии // УФН. – 2005. – Т. 175, № 6. – С. 668–678.
11. ***Шустов Б.М.***
Астероиднокометная опасность: о роли физических наук в решении проблемы // УФН. – 2011. – Т. 181. – С. 1104–1108.

English

Meteorite «Chelyabinsk»: Main Characteristics of the Fall*

Mikhail Ya. Marov – academician, head of Department of Institute of Geochemistry and analytical chemistry named after V.I. Vernadsky, the RAS, 19 Kosygina, Moscow, 119991, Russia
e-mail: marovmail@yandex.ru

Boris M. Shustov – academician, Director of Institute of astronomy of RAS. 48 Pyatnitskaya St. 119017, Moscow, Russia
e-mail: bshustov@inasan.ru

Abstract

The paper deals with Chelyabinsk meteorite fall from the astronomical viewpoint. The main observational data and relevant characteristics are analyzed including entry velocity, dimensions, height of explosion and energy release. Aerodynamic phenomena accompanying the meteorite entry in the Earth's atmosphere of bodies with supersonic velocity, as well as bow shock formation responsible for destructions on the surface are discussed. Estimates of frequency of meteorite falls depending on size and follow up results of collisions with the Earth are given It is specially emphasized that study of the Solar system small bodies is intrinsically related with the fundamental problem of protoplanetary disc evolution and planets formation. Chelyabinsk event is also connected with the problem of cosmic bodies (asteroids-comets) threat to our planet. An assessment of sizes and tracing orbits of the potentially dangerous bodies is a key which poses the necessity of the deployment of both ground based and space telescopes capable to monitor such bodies and warn in advance about space hazards.

Keywords: astronomy, meteorite, explosion, planets formation, asteroids-comets hazard.

References

1. ***Emel'janenko V.V., Popova O.P., Chugaj N.N., Sheljakov M.A., Pahomov Ju.V., Shustov B.M., Shuvalov V.V., Birjukov E.E., Rybnov Ju.S., Ryhlova L.V., Naroenkov S.A., Kartashova A.P., Harlamov V.A., Trubeckaja I.A.***
Astronomicheskie i fizicheskie aspekty Cheljabinskogo sobytija 15 fevralja 2013 g. // Astronomicheskij vestnik. Issledovanija Solnechnoj sistemy. – 2013. – T. 47, № 4.
2. ***Gor'kavyj N.N., Tajdakova T.A., Provornikova E.A, Gor'kavyj I.N., Ahmetvaleev M.M.***
Ajerozol'nyj shlejf Cheljabinskogo bolida // Astronomicheskij vestnik. Issledovanija Solnechnoj sistemy. – 2013. – T. 47, № 4.
3. ***Shuvalov V.V., Svetcov V.V., Trubeckaja I.A.***
Ocenka razmera zony razrushenij, proizvodimyh na poverhnosti Zemli udarami asteroidov razmerom 10–300 metrov // Astronomicheskij vestnik. Issledovanija Solnechnoj sistemy. – 2013. – T. 47, № 4.
4. ***Grigorjan S.S., Ibodov F.S., Ibadov S.I.***
Cheljabinskij superbolid: k fizike vzryva // Astronomicheskij vestnik. Issledovanija Solnechnoj sistemy. – 2013. – T. 47, № 4.
5. ***Galimov Je.M., Kolotov V.P., Nazarov M.A. i dr.***
Rezul'taty veshhestvennogo analiza meteorita «Cheljabinsk» // Geohimija. – 2013. – № 7.
6. ***Zuluaga J.I., Ferrin I.***
A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid (angl.) // arXiv.org. – 2013. –arXiv1302.5377Z – arXiv:1302.5377.
7. ***Zuluaga J.I., Ferrin I., Geens S.***
The orbit of the Chelyab_insk event impactor as reconstructed from amateur and public footage // arXiv.org. – 2013. – arXiv:1303.1796.
8. ***Borovicka J., Spurny P., Shrbeny L.***
Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide // Electronic Telegram /Cambridge, MA: Central Bureau Electronic Telegrams, International Astronomical Union. – 2013. – № 3423.
9. ***Givishvili G.V., Leshhenko L.N., Alpatov V.V. Grigor'eva S.A., Zhuravlev S.V. , Kuznecov V.D., Kusonskij O.A., Lapshin V.B., Rybakov M.***
Ionosfernye jeffekty, stimulirovannye cheljabinskim meteoritom // Astronomicheskij. Vestnik. Issledovanija Solnechnoj sistemy. – 2013. – T. 47, № 4.
10. ***Marov M.Ja.***
Malye tela Solnechnoj sistemy i nekotorye problemy kosmogonii // UFN. – 2005. – T. 175, № 6. – p. 668–678.
11. ***Shustov B.M.***
Asteroidnokometnaja opasnost': o roli fizicheskih nauk v reshenii problemy // UFN. – 2011. – T. 181. – p. 1104–1108.

* *The work was financially supported by RFBR (project № 11-02-00478-a)*

Оптический барьер в схеме космического патруля *

Ахметшин Р.З., Ефимов Г.Б., Энеев Т.М.

Рассмотрена схема космического патруля, которая предполагает создание «оптического барьера» с помощью телескопов на космических аппаратах (КА), размещенных на гелиоцентрической орбите. В его задачу входят обнаружение новых космических объектов (КО), сближающихся с Землей, оценка их опасности, и их каталогизация. Под «оптическим барьером» подразумевается постоянный мониторинг телескопами окрестности Земной орбиты, представляющей собой тор толщиной 0,1 а.е. Эта область должна сканироваться телескопами 4 раза за сутки, для получения 4-х положений каждого вновь обнаруживаемого КО, для оценки параметров его орбиты и его опасности. Для уточнения орбит КО необходимы дополнительные наблюдения, то есть, их последующее «сопровождение». Даны оценки необходимых характеристик телескопов, характеристик оптического барьера, минимальных размеров обнаруживаемых потенциально опасных КО и их количества при различных орбитах размещения КА патруля.

Ключевые слова: астероидная опасность, астероиды сближающиеся с Землей, космический патруль, оптические наблюдения.

* *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-01-00299-а)*

В Институте прикладной математики имени М.В. Келдыша Российской академии наук, начиная с 2000 г., авторами проводились исследования по астероидной безопасности Земли – выявлению космических объектов (КО), представляющих опасность для нее, – поддержанные грантами РФФИ № 04.01.00346а, 06.01.00531а и 09.01.00299а. Эти работы опирались на исследования Т.М. Энеева и его учеников по происхождению Солнечной системы и малых тел в ней, их миграции в окрестность орбиты Земли [1, 2].

Концепция космического патруля, предложенная Т.М. Энеевым [3, 4], предполагает создание «оптического барьера» с помощью телескопов на космических аппаратах (КА), размещенных на круговой гелиоцентрической орбите. Под «оптическим барьером» подразумевается постоянный мониторинг телескопами патруля определенных областей небесной сферы, с целью обнаружения новых КО, сближающихся с Землей, оценки их опасности, и каталогизации, в первую очередь, «потенциально опасных» КО (сближающихся с орбитой Земли на расстояние менее 0,05 а.е.). Размеры области барьера должны быть такими, чтобы даже быстрые объекты не могли проскочить его незамеченными, и зависят как от количества телескопов на орбите, так и от радиуса орбиты (это может быть, например, орбита Земли, как на *рис. 1*, или орбита Венеры). Предполагается с помощью оптического барьера за относительно короткое время работы (5–6 лет) обнаружить подавляющее большинство значимых по своим размерам КО.

При размещении КА и телескопов на орбите Земли, каждый телескоп должен контролировать область барьера, примыкающую к соседнему КА, так как иначе пролетающий вблизи КА объект будет иметь угловую скорость, слишком большую для его наблюдения. Сканирование телескопом «своей» области оптического барьера должно осуществляться более узкими полосами (ширина которых δ зависит от рабочего поля телескопа) по горизонтали или вертикали, (*рис. 2*). Чтобы не пропустить ни один КО, пересекающий контролируемую телескопами область, необходимо дополнительно обеспечить достаточное перекрытие соседних кадров в каждой полосе и в соседних полосах, а также перекры-

АХМЕТШИН Рауф Зульфарович
кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН.

ЕФИМОВ Георгий Борисович
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН.

ЭНЕЕВ Тимур Магометович
академик, главный научный сотрудник Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН.

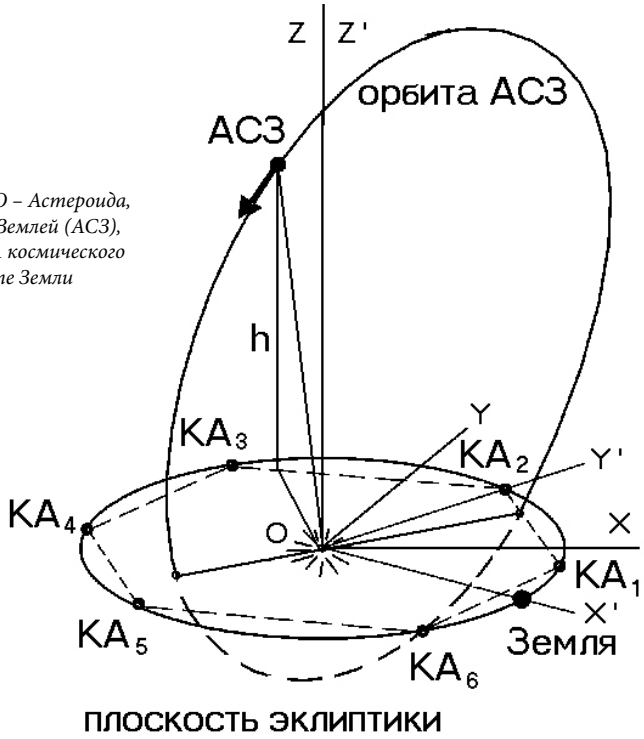


Рис. 1. Орбита КО – Астероида, сближающегося с Землей (АСЗ), и расстановка КА космического патруля на орбите Земли

Рис. 2. Область оптического барьера, сканируемая одним телескопом по горизонтали

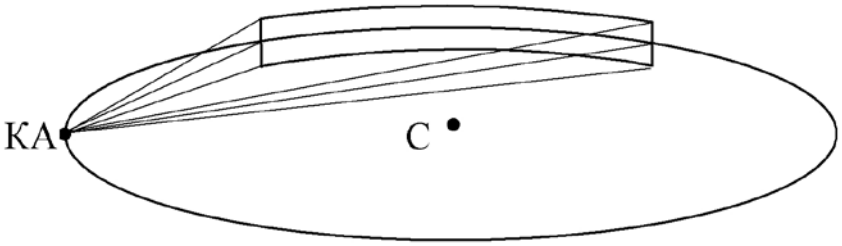
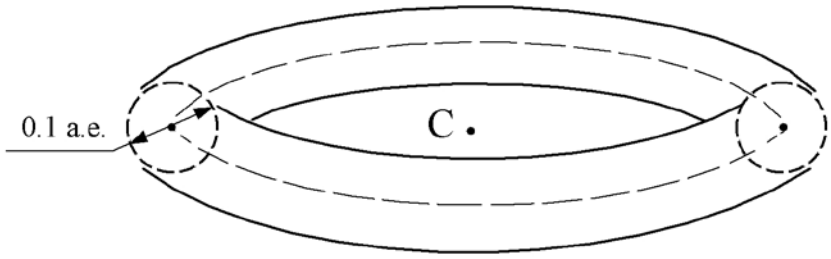


Рис. 3. Пересечение астероидом А окрестности вокруг орбиты Земли, представляющей собой тор толщиной 0,1 а.е.



тие областей, обозреваемых разными телескопами [5]. Область барьера должна сканироваться телескопами 4 раза за сутки, чтобы иметь 4 положения каждого объекта, необходимых для оценки параметров его орбиты.

Для выявления потенциально опасных КО достаточно вести мониторинг окрестности Земной орбиты, представляющей собой тор толщиной 0,1 а.е. (*рис.3*), которую последние обязательно пересекают [6]. Для этого необходимо сканировать круговую полосу вблизи эклиптики, что позволит обозревать окрестность орбиты Земли. Объекты, которые будут обнаружены внутри тора, являются потенциально опасными – для их каталогизации необходимы дополнительные наблюдения, чтобы орбиты были определены с достаточной точностью, т.е. необходимо вести их «сопровождение». Предлагается организовать работу телескопов в двух режимах: сканирование области оптического барьера, и сопровождение обнаруженных потенциально опасных КО [6]. С этой целью предполагается на каждом КА разместить по два телескопа. Один из них, с большим рабочим полем, должен будет осуществлять контроль (сканирование) области барьера, второй – с меньшим рабочим полем, но большей разрешающей способностью – заниматься сопровождением КО. Такая специализация телескопов позволит контролировать большую по площади область барьера, и получать положения КО с достаточно большой точностью, необходимой для определения их орбит. При этом возможна взаимная поддержка телескопами друг друга: наблюдение КО с двух КА позволит определять их орбиты с большей точностью.

Приведены оценки размеров рабочего поля и проницающей способности телескопов, необходимых для выполнения задачи по сканированию области барьера. Приведены также оценки количества «новых» КО, которые могут ежедневно обнаруживаться в области барьера, и количества потенциально опасных объектов среди них, сопровождение которых необходимо обеспечить. То есть, проведена оценка напряженности работы телескопов по сопровождению. Даны примеры характеристик оптического барьера и минимальных размеров обнаруживаемых КО при различных орбитах размещения КА патруля, – на круговой орбите Земли или Венеры. Отмечены редкие случаи, когда КО могут быть не обнаружены космическим патрулем: если КО окажется на снимке вблизи яркой звезды или галактики, и будет ею «засвечен», или если вектор его скорости будет почти параллелен направлению луча телескопа, и сам объект будет выглядеть на последовательных снимках как «неподвижная звезда», а не как движущийся КО.

Литература

1. ***Энеев Т.М., Козлов Н.Н.***
Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем. – I. Численные эксперименты. – Астрономический вестник. 1981. – т.15, № 2. – С. 80–94. – II. Вращение планет и связь с теорией гравитационной неустойчивости. – Астрономический вестник. – 1981. – Т.15, № 3. –С. 131–141.
2. ***Eneev T.M., Kozlov N.N.***
The problems of simulation of planetary systems accumulation processes. – Advance Space Research. – 1981, Vol.1. – PP.201–215.
3. ***Eneev T.M., Efimov G.B., Akhmetshin R.Z., Zaslavsky G.S.***
Space patrol system. / 17-th International Symposium on Space Flight Dynamics. Moscow, 16–20 June, 2003. – Proceedings. – V.1, Moscow. – KIAM. – P.109–114.
4. ***Энеев Т.М.***
Об актуальных задачах исследования дальнего космоса. Космические исследования. – 2005. – Т.43, №6. – С.403–407.
5. ***Энеев Т.М., Ахметшин Р.З., Ефимов Г.Б.***
К вопросу об астероидной опасности. – Космические исследования. – 2012. – Т.50, №2. – С.99.
6. ***Ахметшин Р.З.***
Космический патруль: варианты схемы оптического барьера. – Космические исследования. – 2013. – Т.51, №4. – С.274–286.

English

The Optical Barrier in Space Patrol Scheme*

Rauf Z. Akhmetshin –
PHD, Researcher Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS
4, Miusskaya square Moscow, 1250476, Russia
e-mail: axmetshn@rambler.ru

Georgi B. Efimov –
PHD, Senior researcher Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS
4, Miusskaya square Moscow, 1250476, Russia
e-mail: efimov@keldysh.ru

Timur M. Eneev –
academician, Chief researcher Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS
4, Miusskaya square Moscow, 1250476, Russia
e-mail: eneev@keldysh.ru

Abstract

The scheme of Space Patrol, that supposes to create an Optical barrier with the help of telescopes on the spacecrafts disposed on the circular heliocentric orbit is considered. Optical barrier is aimed to discover new near Earth space objects, estimate their danger and catalogue them. “Optical barrier” means continuous monitoring of Earth vicinity representing a torus with a thickness of 0.1 AU. This area must be scanned by telescopes 4 times a day to get 4 positions of each space object, necessary to estimate it’s orbit and danger. To define the orbit more accurately one need additional fixing of space object positions in regime of tracking. Characteristics of telescopes, of Optical barrier, estimations for different spacecrafts orbits of minimal sizes of potentially dangerous objects that can be discovered and their quantity are given.

Keywords: asteroid hazard, near Earth objects, space patrol, optical observation.

References

1. ***Eneev T.M., Kozlov N.N.***
Model of the accumulation process of the formation of planetary systems. - I. Numerical experiments. - Astronomical journal. 1981. - v.15., № 2. - p. 80-94. - II. The rotation of the planets and the connection with the theory of gravitational instability. - Astronomical journal. - 1981. - V.15., № 3. - p. 131-141.
2. ***Eneev T.M., Kozlov N.N.***
The problems of simulation of planetary systems accumulation processes. – Advance Space Research. – 1981, Vol.1. – p.201–215.
3. ***Eneev T.M., Efimov G.B., Akhmetshin R.Z., Zaslavsky G.S.***
Space patrol system. / 17-th International Symposium on Space Flight Dynamics. Moscow, 16–20 June, 2003. – Proceedings. – V.1, Moscow. – KIAM. – p.109–114.
4. ***Eneev T.M.***
Pressing Issues of the Day in Studying Deep Space. Cosmic Research. – Vol. 43, No. 6. – 2005. – PP.383–387. – Pleiades Publishing, Ltd. – 2005. – Original Russian Text © T.M. Eneev. – 2005, published in Kosmicheskie Issledovaniya. – Vol.43, No. 6. – 2005. – p. 403–407.
5. ***Eneev T.M., Akhmetshin R.Z., Efimov G.B.***
On the Asteroid Hazard. – Cosmic Research. – 2012. – Vol.50, No.2. – PP.93–102. © Pleiades Publishing, Ltd. – 2012.Original Russian Text © T.M. Eneev, R.Z. Akhmetshin, G.B. Efimov. – 2012, published in Kosmicheskie Issledovaniya. – 2012. – Vol. 50, No.2. – p. 99–108.
6. ***Akhmetshin R.Z.***
Space Patrol: Variants of the Optical Barrier Scheme. – Cosmic Research. – 2013. – Vol.51, No. 4. – p.241–253. © Pleiades Publishing, Ltd. – 2013. Original Russian Text © R.Z. Akhmetshin. – 2013, published in Kosmicheskie Issledovaniya. – 2013. – Vol.51, No.4. – p.274–286.

* *The work was financially supported by RFBR (project № 09-01-00299-a)*

Космическая угроза. Стратегия выживания*

Мушаилов Б.Р .

Рассмотрены интегральные аспекты космической угрозы с учетом эндогенных и антропогенных факторов. Приведены варианты альтернативных стратегий реагирования на катастрофические угрозы человечеству, в том числе – кометно-астероидную опасность.

Ключевые слова: астероид, комета, метеороид, Солнечная система, моделирование, вероятность столкновений, планетонавтика, автономные планетные поселения, космическая угроза.

** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №00-02-17744, №06-02-16795)*

Долгопериодическая эволюция процессов, происходящих на Земле, в том числе, и в биосфере, неразрывно связана с Солнечной системой [1]. Одним из катастрофических факторов подобного влияния является космическая угроза – кометно-астероидная опасность.

В настоящей работе были проведены комплексные исследования по проблеме происхождения и динамической эволюции астероидов и комет в Солнечной системе. Разработана строгая классификация малых тел Солнечной системы по месту их происхождения (а следовательно, по их физико-химическому составу) и динамическим характеристикам. Проведено моделирование эволюции орбит и исследованы статистические закономерности распределения малых тел Солнечной системы. Предсказано существование нескольких занептунных поясов, которые необходимо учитывать при определении суммарного числа тел и конкретных оценок масс объектов, способных мигрировать к Земле. Дано также объяснение тому факту, что крупные ядра комет обнаруживаются с перигелиями орбит, располагающимися за орбитой Юпитера. На основе разработанной теории приливной эволюции, обуславливающей периодичность солнечных циклов, значительно повышена точность прогнозирования вспышечной активности короткопериодических комет и нестационарных метеорных потоков. Разработан новый метод оценки величины и распределения «скрытой массы» в Солнечной системе, базирующийся на корреляции параметров солнечного цикла с полным внешним приливным динамическим воздействием на Солнце тел Солнечной системы, включая и пока необнаруженные. Проведена оценка вероятностей столкновений астероидов, сближающихся с Землей, а также комет [2–6].

МУШАИЛОВ
Борис Романович
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга.

В настоящее время на Земле обнаружено около 200 астроблем – следов кратеров ударных космических тел. Максимальная глубина кратеров достигает половины толщины земной коры ~ 20 км. Диаметр кратеров в первом приближении на порядок больше «ударника» – среднего диаметра астероида.

Среди импактных структур, выявленных на территории России, выделяются: Попигайская (диаметр кратера D≈100 км, возраст T≈35 млн лет), Пучеж-Катункская (D≈80 км, T≈180 млн лет), Карская (D≈70 км, T≈70 млн лет). Однако число астроблем невелико для того, чтобы корректно выявить закономерности в «предпочтительности» их распределений *(рис. 1)*.

Вымирание отдельных биологических видов, а также массовое появление кратеров на Земле могло быть связано с интенсивными бомбардировками поверхности Земли «кометными ливнями» (по некоторым оценкам во время такого ливня на Землю могло выпадать до 200 кометных ядер). Бомбардировка Земли кометами происходила не непрерывно, а относительно короткими порциями. Длительность каждой такой бомбар-

дировки в среднем была в 1000 раз короче, чем промежуток времени между ними. За время существования Солнечной системы произошло около десяти кометных «бомбардировок», вызванных прохождениями звезд через внутренний кометный банк Хиллса [3, 7].

Последствия для биосферы от столкновений с Землей кометных ядер могут в большей степени оказаться катастрофическими, нежели столкновения с сопоставимыми по размерам астероидами, из-за интенсивного рассеивания кометного вещества. Значительное уменьшение прозрачности земной атмосферы за счет кометной бомбардировки может приводить к вымиранию сначала простейших, а затем более сложных видов [8].

Падение на Землю небесных тел (астероидов или комет) с диаметрами d≥5 км способно вызвать катастрофу глобального масштаба (характерное время T выпадения на Землю подобных объектов T=20÷30 млн лет), а при 0,5<d<1 км (T=10÷100 тыс. лет) – разрушения регионального масштаба. Небесные объекты меньших размеров могут вызвать локальные повреждения на поверхности Земли. При этом масштабы повреждений (поражений) существенно зависят от степени заселенности местности, в которой произойдет падение небесного тела. За последнее время вблизи Земли пролетели несколько сравнительно крупных небесных тел. Сильную тревогу вызвало в 1936 г. прохождение астероида Адонис, средним диаметром (d) около 1 км, на расстоянии около 2 млн км от Земли. А настоящую панику вызвал в 1937 г. астероид Гермес, имеющий диаметр ≈1,5 км, промчавшийся лишь на расстоянии 800 тыс. км от Земли. Позже (в 1992 г.) большой ажиотаж был связан с приближением к Земле малой планеты Тоутатис (d~3 км; на расстоянии ~ 450 тыс. км). Астероид 2005 YU55 (d~400 м) 8 ноября 2011 г. пролетел на расстоянии

Рис. 1. Распределение ударных космических кратеров на поверхности Земли. Наибольшее их количество обнаружено в наиболее обследованных районах

около 325 тыс. км от Земли, что составляет примерно 85% расстояния от Земли до Луны, астероид 2007 TU24 (d~270 м) 29 января 2008 г. сблизился до 500 тыс. км. Ныне знаменитый 300-метровый астероид Апофис 13 апреля 2029 г. промчится, по имеющимся в настоящее время оценкам, примерно в 40 тыс. км от нашей планеты. Астероид 2011 AG5 (d~140 м), обнаруженный 8 января 2011 г., как и астероид 2013 TV135 (d~410 м), внесенный в Электронный циркуляр Центра малых Планет MAC 16 октября 2013 г. (d~410 м), в 2040 г. и 2032 г., соответственно, сблизятся с Землей всего лишь до расстояния в несколько тысяч километров.

С Землей неоднократно сближались метеороиды диаметрами менее 100 м. Так 2004 TS26 9 октября 2008 г. сблизился с Землей до расстояния в 6150 км, 2004 FU162 31 марта 2004 г. – до 6535 км, 2009 VA – 9 ноября 2009 г. до 14000 км. Объект 2009 DD45 (20÷50 м) был обнаружен 28 февраля 2009 г. за три дня до сближения на ~70 тыс. км. Объект 2010 AL30 (d~15 м) – обнаружен 11 января 2010 г., а 13 января пролетел на расстоянии 130 тыс. км от Земли. Метеороид 2012 DA14 (d~50 м) 15 февраля 2013 г. пролетел на расстоянии 27,7 тыс. км *(рис. 2)*.

Метеороид, размером около 20 м, состоящий из сфероидальных образований преимущественно силикатного состава (так называемый каменный метеорит подкласса хондрит) в окрестности г. Челябинска взорвался 15 февраля 2013 г. примерно в 9:20 по местному времени на высоте 15÷25 км. По числу пострадавших падение этого метеороида не имеет аналогов в мировой задокументированной истории. Судя по продолжительности (~30 сек) атмосферного полета, движение метеороида происходило под очень острым углом к поверхности Земли. Разрушения были вызваны распространением ударных волн. Из-за пологой

Рис. 2. Орбита метеороида 2012 DA14, впервые обнаруженного 23 февраля 2012 г. и сблизившегося с Землей до расстояния в 27,7 тыс. км 15 февраля 2013 г.

траектории только сравнительно небольшая часть энергии от взрывов достигла населенных пунктов. Скорость метеороида при падении составила от 20 до 70 км/с. Движение вызвало мощное свечение (болид). Большая часть фрагментов испарилась, а до земли долетели лишь некоторые из них.

Астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), условно можно разделить на группы: астероиды группы Аполлона, орбиты которых пересекаются с земной, группы Атона и Амура, орбиты которых – внутри или вне земной орбиты, соответственно, но близки к последней. К числу объектов, сближающихся с Землей, следует отнести также короткопериодические кометы и крупные фрагменты метеорных потоков. При этом значительная часть так называемых АСЗ может приходиться на «угасшие» кометы.

В настоящее время в окрестности орбиты Земли могут двигаться более миллиона космических объектов как астероидного, так и кометного происхождения, размером в десятки и более метров. Из них обнаружены и признаны безопасными лишь около 1%. Известных потенциально опасных объектов с диаметром более 100 м – несколько тысяч, 10% из них кометы. Часть тел, мигрировавших к Земле из различных областей Солнечной системы, в дальнейшем пополняло семейство астероидов, орбиты которых почти целиком находятся внутри орбиты Земли (а некоторые орбиты – внутри орбиты Венеры). Число подобных объектов может быть велико. Эти объекты опасны тем, что приближаются к Земле со стороны Солнца, и их появление трудно прогнозировать, так что существует реальная опасность столкновения Земли с необнаруженными космическими объектами. С учетом роста на Земле опасных производств космические катастрофы могут быть вызваны и относительно мелкими космическими объектами, исчисляемыми всего лишь несколькими метрами.

Ежегодно с Землей сталкиваются в среднем 2 железных или каменных тела массой более 100 т. Мелкие же астероидные осколки (глыбы метровых размеров, камни и пылевые частицы, включая и кометного происхождения) непрерывно падают на Землю ежегодно в виде десятков тысяч тонн космического вещества.

Вероятность столкновения кометы с Землей за время жизни одного поколения оценивается как 6 шансов из 10 миллионов. В Сибири в бассейне реки Подкаменной Тунгуски 30 июня 1908 г. упало небесное тело, именуемое теперь «Тунгусским феноменом». В настоящее время существуют весомые основания считать, что это небесное тело было осколком ядра кометы Энке. Реальной оценкой энергии Тунгусского феномена является величина ≈6 Мт ($E=2{,}5\cdot10^{23}$ эрг). Энергия Тунгусского феномена эквивалентна землетрясению с магнитудой M=7,7.

При падении космического тела (астероида) диаметром около 10 км в океан глубиной 4÷5 км возникнет «водяной» вал высотой порядка глубины океана на расстоянии около 25 км от места удара (при скорости падения тела в 20÷30 км/с). При диаметре космического тела в 2 км высота вала на тех же расстояниях составит уже примерно 1 км. В случае падения метеорита диаметром всего ≈200 м в область океана со средней глубиной ≈0,6 км (средняя глубина Балтийского моря) должна образоваться волна с начальной амплитудой около 500 м [8].

При распространении волны от места удара (места падения тела) амплиту-

да волны затухает примерно обратно пропорционально ее радиусу, но оставаясь существенной на больших расстояниях. Так, для тела диаметром 2 км высота волны составляет примерно 10 м на расстоянии до 2 тыс. км от места падения.

Мировому сообществу реальная опасность для человечества будущих неминуемых столкновений Земли с объектами космического происхождения была наглядно продемонстрирована в июле 1994 г. при падении фрагментов кометы Шумейкеров-Леви 9 на Юпитер ***(рис. 3)***. Для Земли подобное столкновение означало бы конец существования человеческой цивилизации.

Начиная с 1991 г., проводились лишь специализированные конференции и разовые программы астрономических наблюдений за космическими объектами, движущимися вблизи Земли.

21 февраля 2013 г. Европейское космическое агентство (ЕКА) приступило к созданию в Европе единой системы оповещения о метеоритах. Только в 2008 г. была начата программа ЕКА по слежению за ситуацией в космосе. ЕКА приступило к разработке прототипа нового телескопа с зеркалом диаметром 1 м и большим углом обзора. В будущем ЕКА планирует ввести в строй шесть таких роботов-телескопов. Задача ЕКА – распознавать объекты диаметром свыше 50 м минимум за три месяца до их приближения к Земле.

В стратегии национальной безопасности России до последнего времени ничего не упоминалось об астероидно-кометной угрозе! В настоящее время имеются лишь гипотетические проекты типа системы планетарной защиты «Цитадель» или федеральная целевая программа по противодействию космическим угрозам. В то время как в США по программе финансирования космических угроз с 1998 г. ежегодно выделяется не менее 20 млн долларов. На современном этапе фиксируются траектории движения лишь самых

Рис. 3. Орбита кометы Шумейкеров-Леви 9, фрагменты которой столкнулись с Юпитером в период с 18 по 24 июля 1994 г.

крупных космических объектов. До настоящего времени не реализована межгосударственная кооперация по проблеме предотвращения космической угрозы.

Ввиду отсутствия достаточной информации о распространенности различных объектов в Солнечной системе (особенно небесных тел размерами десятки и сотни метров, которые могут представлять опасность при их падении на Землю) в ближайшей перспективе актуальной задачей может представляться лишь заблаговременное обнаружение и систематизация (каталогизация) космических объектов, потенциально угрожающих обитателям Земли. В обозримой перспективе будет оставаться неразрешимой возможность предотвращения космической катастрофы ввиду неэффективности обсуждаемых методов отклонения сближающихся с Землей объектов, способных вызвать глобальную катастрофу (ударное воздействие, доставка на поверхность объекта ракетных двигателей большой и малой тяги, использование солнечных парусов, взаимные столкновения по типу бильярдных шаров и т.п.). Предлагаемые способы концептуально сродни вариантам захоронения отработавшего ядерного топлива по типу: рассеивания в космосе, сбрасывания на Солнце и т.п.

Кроме непосредственно космической угрозы, опасность для существования и развития человечества представляют также и последствия деятельности самого человечества: глобальная катастрофа, вызванная применением оружия массового поражения, истощение природных ресурсов планеты, необратимые экологические и климатические изменения, эпидемии мирового масштаба и т.п. В целом глобальными

угрозами для выживания человечества, помимо космических факторов, являются:

– коэволюция Земли – природно-климатические воздействия, такие как извержения вулканов, цунами, землетрясения, наводнения, пожары, засухи. За последние 10 лет от природных катаклизмов пострадало около 3 млрд человек (~1/3 населения планеты);

– духовно-нравственная деградация – распространение культа насилия, упадок образцов искусства, культуры, отсутствие гармонии в отношениях между поколениями, фобии и т.п.;

– техногенно-экологические проблемы: антропогенное влияние на гидро- и атмосферу, загрязнение суши, уничтожение лесов, исчезновение биологических видов, нарушение биогеохимического круговорота, пандемии, оружие массового поражения, межэтническое и религиозное противостояния, политическая и экономическая нестабильность и т.п.

За первую треть 2010 г. число извержений вулканов в мире превысило годовой среднестатистический показатель извержения вулканов в течение предыдущих 100 лет. Число сильных землетрясений и извержений вулканов (число погибших) с 2000 г. свидетельствует об их резком росте, негативные последствия этого для человечества могут быть катастрофическими.

Динамическая система Человек-Природа устойчива к малым возмущениям, то есть, обладая самовосстановительным потенциалом, человек адаптируется к ним, а природа компенсирует (нейтрализует) их. Но значительные (глобальные) возмущения (в результате космических, эндогенных либо антропогенных факторов) могут вывести систему из устойчивого состояния и привести либо к формированию существенно неравновесного процесса (катастрофическим изменениям), либо к эволюции системы в сторону иных (квазиравновесных) состояний. Однако в связи с чрезвычайно высокой избирательностью мира, иные квазиустойчивые состояния могут оказаться запредельными для существования человека [1].

Существующие проекты противодействия катастрофическим угрозам Земли ошибочно руководствуются исключительно концепцией превращения Земли в неприступную крепость («стратегией сдерживания угрозы»). Однако в сложившейся ситуации необходимы и конструктивные действия по превентивной разработке мер, направленных на сохранение человечества в случае наступления катастрофических последствий на поверхности Земли. К их числу относится развертывание комплексных проектных работ по созданию и опытной эксплуатации автономных планетных поселений (АПП) с базовыми вариантами размещения на больших глубинах Земли, под горными массивами и на донной поверхности морей и мирового океана, а также, в перспективе, и на иных космических объектах Солнечной системы [9–12].

Такая комплексная программа («Иной Контин(г)ент») способна не только служить эффективным интегратором и быть парадигмой существующих достижений авиакосмических, подводных, полярных, горнорудных и многих других наукоемких технологий. Во многом она будет способствовать ускоренному росту, эффективности и конкурентоспособности современных технологий, созданию новых рабочих мест и рынков сбыта, разрешению в различных природно-климатических условиях проблем, с которыми человечество без комплексного подхода не способно справиться на Земле сегодня и с которыми в скором времени столкнется в дальнем космосе при реализации новой доктрины – планетонавтики, то есть, комплексной программы, нацеленной на разработку стратегии и тактики создания автономных планетных поселений как на Земле, так и на иных космических объектах.

Стартовой основой данной концепции является фиксированный эволюционный статус биологического вида Homo sapiens, для сообщества которого и предназначены АПП. Несмотря на эволюционный характер взаимоотношений Homo sapiens с окружающим миром (со средой обитания), их устойчивое сосуществование базируется на фундаментальных незыблемых принципах устройства мира, соподчиненности и взаимообусловленности его структурных единиц, являющихся следствиями целесообразности и гармонии мира, физико-химического единства живого и неживого, асимметрии времени и т.п. Наличие неотъемлемых фундаментальных взаимосвязей между структурными единицами мира предопределяет стратегию и тактику создания устойчивых АПП, существенно ограничивает диапазон приемлемых параметров инфраструктуры автономных

поселений, а также допустимые пределы изменений в функционировании организмов и психологии будущих жителей АПП. Выбор оптимальных зон (терра-среды обитания) АПП реализуется по неотъемлемым критериям, обеспечивающим устойчивое существование [9].

Научно-креативная программа «Иной Контин(г)ент» призвана объединять творческих людей всех стран для поиска векторов будущих открытий и достижений во всех сферах деятельности как в космосе, так и на Земле. Под девизом «будущее как причина настоящего» реализация концепции планетонавтики позволит выявить новое содержание альянса науки, бизнеса и власти. Приоритетами в планетонавтике являются, наряду с фундаментальными аспектами построения АПП, обоснованием комплексных технических заданий и проектно-конструкторских разработок, апробацией инфраструктуры автономных планетных поселений и целый ряд социокультурных аспектов освоения экстремальных сред. Объектами исследования в планетонавтике являются типоряды автономных поселений («автономий»), включая их предельные случаи (асимптотическое проектирование) – глубокого подземного и подводного базирования, поселения на Луне, Марсе и иных объектах Солнечной системы. При этом модели исследования классифицируются на модели управления и самоорганизации автономных поселений, энергетической, физической, технической, информационной, психологической безопасности, типологии автономных поселений, семантические модели, сценарии жизнедеятельности и т.п.

Задачи комплексной программы «Иной Контин(г)ент» включают в себя следующие базовые аспекты *(рис. 4)*:

1. **Терраформирование**. Охватывает проблемы формирования жилой среды обитания автономий: это и землеустройство, климат-формирование, агротехнологии рекультивации растительной почвы, получения типовых составов грунтов, комплексной разведки и добычи полезных ресурсов, включая производственное сырье, жизненно значимые ресурсы и т.п.;
2. **Социокультуросфера**. Постижение феномена автономности, гармонии социальной самоорганизации и управления, исследование морально-этических императивов развития, разработка методико-информационных основ социального проектирования и моделирования жизненных стратегий автономных поселений, в том числе автономных поселений как хозяйствующих субъектов, и многое другое;
3. **Урбанизм и когнитивная архитектура.** Сама среда АПП должна быть наделена свойствами адаптивности и поисковой коммуникации, способствующей развитию диалога «человек-среда»;
4. **Инженерная инфраструктура.** Включает в себя весь комплекс проблем по энергообеспечению, водоснабжению, синтезу воздуха, вентиляции, кондиционированию и термостатированию, утилизации отходов, физическим каналам коммуникаций, аудиовизуальной среде, компьютерному обеспечению и т.п.;
5. **Пищевой круговорот (гомеостаз).** Решаются проблемы обеспечения оптимального рациона питания жителей АПП;
6. **Комплексная безопасность.** В том числе, информационно-психологическая безопасность, энергетическая безопасность, техническая безопасность, физическая безопасность;
7. **Резервы экспансии.** Это нетривиальный аспект проектирования, не имеющий методологических аналогов в истории человечества. Проблематика автономных поселений вписывается в более общую проблему ресурсного подхода

Рис. 4. Основные аспекты программы автономных поселений

к существованию социума, т.е. существования социума при дефиците ресурсов. При этом в качестве ресурсов рассматриваются не только материально-энергетические ресурсы, но и политический ресурс (власть), символический капитал (влияние), физический ресурс (здоровье, витальный потенциал), интеллектуальный ресурс (знания, идеи), эмоциональный ресурс (чувства, переживания), культурно-семиотический ресурс (смыслы и значения) и т.д. В целом Программа «ИноКонт» предусматривает решение проблем, связанных с мониторингом, моделированием и прогнозированием стихийных бедствий, кризисов и катастроф, проведение фундаментальных, поисковых и прикладных исследований в интересах обеспечения защищенности опасных объектов и населения, что, безусловно, будет являться основой для широкой международной научно-технической кооперации, послужит источником масштабного локомотивного эффекта для всех базовых отраслей науки и промышленности, а для российской экономики – условием эффективного и экологически обоснованного освоения минерально-сырьевого потенциала арктической стратегической зоны, качественного нового социального развития регионов страны.

Международная научно-креативная программа «Иной Контин(г)ент» рассчитана на длительную перспективу, включает в себя создание более 380 прототипов АПП во всех природно-климатических зонах Земли, строится на организационно-финансовой модели паевых инвестиций заинтересованных стран.

В настоящее время в рамках исследований по терраформированию в проблеме автономных поселений наиболее целесообразной является комплексная разработка и апробация наземных и подземных (подводных) прототипов (полигонов). На первых этапах построения автономных поселений целесообразным может быть создание плацдарма в виде протяженных оранжерей-городов (локальной искусственной биосферы), обеспечивающих приемлемые условия для временного существования.

Таким образом, имеются варианты альтернативных стратегий реагирования на катастрофические угрозы человечеству, в том числе, кометно-астероидную опасность. Альтернативная «сдерживанию угрозы» стратегия не рассматривает Марс и другие планеты как объекты «колонизации», а исходит из понимания их как «новой Родины». Следовательно, проблемы взаимодействия человечества с космосом становится делом всех землян.

Литература

1. ***Мушаилов Б.Р.***
О фундаментальных принципах планетонавтики. Будущее как причина настоящего // ИноКонт. – 2011. – http://inocont.net/index.php/78-kontsepty/85-o-fundamentalnykh-printsipakh-planetonavtiki.html.
2. ***Мушаилов Б.Р., Теплицкая В.С.***
О роли резонансных объектов в статистических распределениях кентавров и занептунных объектов // Вестник Моск. ун-та. – Серия 3. Физика. Астрономия. – 2010. – №1. – С. 59-64.
3. ***Герасимов И.А., Мушаилов Б.Р.***
О проблеме происхождения и динамической эволюции астероидов и комет в Солнечной системе // Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. – М.: Изд-во «Космосинформ». – 2000. – С. 17–27.
4. ***Мушаилов Б. Р., Герасимов И.А., Рыхлова Л.В.***
О механизме, индуцирующем возникновение периодичностей основных характеристик солнечного цикла // Труды гос. астроном. института имени П.К.Штернберга МГУ, т. 70. – М.: Изд-во «Янус-К». – 2004. – С. 238–250.
5. ***Мушаилов Б.Р.***
О множественности линдбладовских резонансных зон за поясом Койпера // Труды гос. астроном. института имени П.К.Штернберга МГУ, т. 70. – М.: Изд-во «Янус-К». – 2004. – С. 251–257.
6. ***Герасимов И.А., Мушаилов Б.Р., Рыхлова Л.В.***
О некоторых эффектах приливной эволюции в системе Земля-Луна-Солнце // Астрон. журнал. – 1999. –Т. 76. – С. 793–800.
7. ***Мушаилов Б.Р.***
О проблеме кометно-астероидной опасности // Астрон. календарь на 1997 г., – М.: Изд-во «Космосинформ». – 1997. – С. 210–219. – http://www.astronet.ru/db/msg/1220319.
8. ***Катастрофические воздействия космических тел***
Под ред. В.В. Адушкина и И.В. Немчинова. Институт динамики геосфер РАН. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 310 с.
9. ***Мушаилов Б.Р.***
О концепции терраформирования на современном этапе реализации проекта создания АП. Будущее как причина настоящего // ИноКонт. – 2011. – http://www.inocont.net/index.php/ru/swaz/87-2011-04-04-15-35-53.html.
10. ***Мушаилов Б.Р., Сайфуллин Н.Ф.***
От космонавтики – к планетонавтике // Материалы международной конференции «Человек-Земля-Космос», посвященной 50-летию со дня полета в космос Ю.А. Гагарина. – Калуга: Изд-во «ООО Ваш домЪ». –2011. – С. 143–146.
11. ***Malinetskij G.G., Mitin N.A., Mushailov B.R., Sayfullin N.F., Sirazetdinov R.T.***
Independent settlements of underground basing problems of complex designing and ability to live maintenance // International conference Asteroid-Comet Hazard-2009. September 21–25, 2009. St. Petersburg. Russia. Book of Abstracts St. Petersburg, 2009. – IAA RAS, 2009. – P. 253–255.
12. ***Hickman J.***
The Political Economy of Very Large Space Projects // JOURNAL OF EVOLUTION AND TECHNOLOGY. – 1999, vol. 4. – http://www.webcitation.org/64qfeMeV8 (Accessed 21 January 2012).

English

Cosmic Threat. The Strategy of Survival*

Boris R. Mushailov-
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Leading Scientist Sternberg State Astronomical Institute of Moscow State University
13, Universitetsky pr., Moscow, 119992, Russia
e-mail: brm@sai.msu.ru

Abstract

Integral aspects of the space threat when taking into account endogenous and anthropogenic factors have been considered. The options for alternative strategies for responding to a catastrophic threat to the human race, including the comets and asteroids attacks, were presented.

Keywords: asteroid, comet, meteoroid, Solar system, simulation, the probability of collisions, planetonautics, autonomous planetary settlements, space hazard.

References

1. ***Mushailov B. R.***
On the fundamental principles planetonautics. The future results from the present. Inocont., 2011. Available at: http://inocont.net/index.php/78-kontsepty/85-o-fundamentalnykh-printsipakh-planetonavtiki.html (in Russian).
2. ***Mushailov B. R., Teplitskaya V. S.***
On the role of resonance effects in statistical distributions of centaurs and trans - Neptunian objects. Moscow University Physics Bulletin, 2010, vol. 65, no. 1, pp. 59–64 (in Russian).
3. ***Gerasimov I. A., Mushailov B. R.***
The problem of origin and dynamic evolution of asteroids and comets in the solar system. Near-Earth astronomy and the problems of investigations of small bodies in the Solar system [Collected papers Obninsk 1999, October 25-29. Russian academy of sciences institute of astronomy], 2000, pp. 17-27(in Russian).
4. ***Mushailov B. R., Gerasimov I. A., Rykhlova L.V.***
On the mechanism that induces the appearance of the periodicities of the main characteristics of the solar cycle. Trudy State Astronomical Institute Sternberg of the Moscow State University [Moscow. Publishers «Janus-K»], 2004, vol. 70, pp. 238-250 (in Russian).
5. ***Mushailov B. R.***
About multiplicity Lindblad resonance zones for of the Kuiper belt. Trudy State Astronomical Institute Sternberg of the Moscow State University [Moscow. Publishers «Janus-K»], 2004, vol. 70, pp. 251-257 (in Russian).
6. ***Mushailov B. R., Gerasimov I. A., Rykhlova L.V.***
On tidal evolution effects in the Earth-Moon-Sun system. ASTRON REP, 1999, vol. 43, no 10, pp. 696-703.
7. ***Mushailov B. R.***
On the problem of the comet and asteroid hazard. Astron. Calendar for 1997 [Moscow. Publishers «Kosmosinform»], 1997, pp. 210-219. Available at: http://www.astronet.ru/db/msg/1220319 (in Russian).
8. ***The catastrophic impact of cosmic bodies***
[Ed. V.V. Adushkin and I.V. Nemchinov. Institute of Geosphere Dynamics RAS]. Moscow. ICC «Akademkniga», 2005. 310 p. (in Russian).
9. ***Mushailov B. R.***
On the concept of terraforming at the present stage of the project for AS. The future results from the present. Inocont., 2011. Available at: http://www.inocont.net/index.php/ru/swaz/87-2011-04-04-15-35-53.html (in Russian).
10. ***Mushailov B. R., Sayfullin N.F.***
From space - to planetonautics. Proceedings of the International conference "Human-Earth-Space" on the 50th anniversary of the space flight Y.A. Gagarin [Publishers «Ltd. Your Home»]. Kaluga, 2011, pp. 143-146 (in Russian).
11. ***Malinetskij G.G., Mitin N.A., Mushailov B.R., Sayfullin N.F., Sirazetdinov R.T.***
Independent settlements of underground basing problems of complex designing and ability to live maintenance. International conference Asteroid-Comet Hazard-2009. September 21-25, 2009. St. Petersburg [Book of Abstracts St. Petersburg, 2009. IAA RAS], St. Petersburg, 2009, pp. 253-255.
12. ***Hickman J.***
The Political Economy of Very Large Space Projects. Journal of Evolution and Technology, 1999, vol. 4. Available at: http://www.webcitation.org/64qfeMeV8 (Accessed 21 January 2012).

* *The work was financially supported by RFBR (project №00-02-17744, №06-02-16795)*

Физические явления при падении небольших космических тел на землю и их моделирование *

Шувалов В.В., Артемьева Н.А.

В статье описаны физические процессы при входе космических тел в атмосферу Земли (торможение, абляция, фрагментация) и современнее численные методы их моделирования. Взаимодействие с атмосферой тела размером порядка 80 м приводит к эффектам, наблюдавшимся при падении Тунгусского космического тела: вывалу леса, образованию массивного мезосферного облака, состоящего из частиц космического вещества и льда. Челябинский метеороид был примерно в 4–5 раз меньше, но ударная волна, дошедшая до поверхности, оказалась достаточно сильной, чтобы выбить стекла на площади порядка 2000 км^2. По-видимому, тела размером порядка 10–100 м являются наиболее опасными для современного человечества: они многочисленны, но их трудно обнаружить; не достигая поверхности земли, они, тем не менее, могут нанести большой ущерб при попадании в густонаселенные районы.

Ключевые слова: астероид, атмосфера, абляция, фрагментация, энерговыделение, математическая модель, Тунгусское космическое тело, Челябинский метеороид, астероидная опасность.

* *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №13-05-00309)*

Физические процессы, сопровождающие вход в атмосферу метеороидов

Метеороид, так же как и самолет, двигаясь в атмосфере, разгоняет и нагревает воздух, попадающийся ему на пути. Нагрев и ускорение воздуха происходят в ударной волне, которая образуется перед метеороидом или самолетом (если он летит со сверхзвуковой скоростью). Нагрев воздуха пропорционален квадрату скорости летящего объекта. Тогда как скорость самолета не превышает нескольких скоростей звука, т.е. не больше 1–2 км/с, скорость метеороида при входе в атмосферу составляет от 12 до 72 км/с (средняя для Земли скорость подлета – 18 км/с). Поэтому воздух перед метеороидом нагревается в 100–1000 раз сильнее, чем перед самым быстрым самолетом, до температур в тысячи и даже десятки тысяч градусов. Вещество при такой температуре обычно сильно излучает, «светит» – мы видим яркую вспышку. Часть испускаемого горячим воздухом излучения падает на поверхность самого метеороида, вызывая его испарение. Нечто похожее происходит при входе в атмосферу космических аппаратов, которые имеют скорость много большую, чем самолеты, но все же меньшую, чем метеороиды. При этом часто говорят, что «аппарат сгорел при входе в плотные слои атмосферы». Строго говоря, это утверждение неверно. Горение – это самоподдерживающаяся реакция взаимодействия с кислородом, идущая с выделением тепла. В данном случае речь идет об испарении, вызванном мощными потоками излучения. Обычно при падении небольших (несколько метров и меньших) метеороидов до поверхности долетает не более нескольких процентов их начальной массы, остальное испаряется.

Еще одно отличие полета метеороида от полета самолета состоит в длительности наблюдения. Обычно видимый участок траектории составляет несколько десятков километров. Самолет пролетает такое расстояние примерно за минуту, а метеороид – за несколько секунд.

Впрочем, если рассматривать явление более детально, то появляются еще два важных отличия между полетом **самолета** и полетом метеороида. Первое связано с тем, что самолет обычно летит с постоянной скоростью и горизонтально, т.е. плотность воздуха на его пути не меняется. Метеороид же летит сверху вниз, плот-

ШУВАЛОВ Валерий Викторович
доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Математического моделирования геофизических процессов Института динамики геосфер РАН.

АРТЕМЬЕВА Наталья Анатольевна
кандидат физико-математических наук, Институт динамики геосфер РАН.

ность воздуха возрастает экспоненциально. Вначале, двигаясь в верхних слоях атмосферы, метеороид отдает атмосфере очень мало энергии из-за малой массы воздуха на его пути, по мере возрастания плотности воздуха энерговыделение увеличивается, но в конце тело тормозится до скорости свободного падения, энерговыделение снова прекращается. Следовательно, имеется высота максимального энерговыделения, которую часто и называют высотой «метеорного взрыва».

Второе важное отличие состоит в том, что форма самолета остается неизменной, а метеороид в полете разрушается. «Разрушение» может приводить к существенному увеличению энерговыделения. При разрушении суммарная площадь поперечного сечения фрагментов метеороида больше, чем площадь поперечного сечения исходного тела. Поэтому «разрушенное» тело вовлекает в движение большую массу воздуха и, соответственно, выделяет больше энергии в атмосфере. Кроме того, фрагментация метеороида приводит к увеличению суммарной площади его поверхности, что вызывает усиление испарения. Отдельные вспышки, которые часто наблюдаются при входе метеороидов в атмосферу, связаны именно с моментами «разрушения».

Однако даже в специальной литературе под словом «разрушение» часто понимают разные процессы. Твердые тела, в том числе, и метеороиды, каменные, железные или ледяные, обладают определенной прочностью. Это означает, что требуется определенное усилие (иногда очень большое) для того, чтобы изменить форму тела. В противоположность твердым, жидкие тела прочности не имеют. Большинство метеороидов, как и обычных камней, неоднородны (не являются монокристаллами), имеют сложную структуру с множеством трещин и неоднородностей, связанных с историей их формирования и эволюции в поясе астероидов. Чем больше тело, тем больше вероятность того, что в нем есть трещины и/или слабые места. Поэтому чем больше тело, тем его легче расколоть, разъединить на части, т.е. тем меньше его прочность. При движении метеороида в атмосфере он испытывает большие аэродинамические нагрузки, быстро увеличивающие по мере проникновения метеороида в нижние плотные слои атмосферы. Эти нагрузки раскрывают трещины, и тело теряет свою прочность, превращаясь в груду обломков (фрагментов). Потерю прочности и будем называть разрушением. С этой точки зрения метеороиды, состоящие из песка или из воды, изначально считаются разрушенными.

Разрушенное тело под действием аэродинамических нагрузок начинает деформироваться: капля изменяет свою форму (сплющивается), а куски разрушенного метеороида разлетаются (из одного тела образуется несколько). Фрагменты разрушенного метеороида имеют большую прочность, чем исходное тело, и в течение некоторого времени летят, не разрушаясь. Простые оценки, подтверждаемые данными по кратерным полям, показывают, что скорость расхождения фрагментов (а также скорость расплющивания капли) зависит только от скорости метеороида вдоль траектории и отношения плотностей вещества метеороида и окружающего воздуха. Эта скорость не зависит от размера метеороида (и его кусков) и для каменных метеороидов на высотах порядка 40 км равна 10 м/с [1, 2, 3, 4]. Если тело имеет размер порядка 50–100 м (как «Тунгуска»), то на участке траектории длиной 10 км его поперечный размер увеличится всего на несколько метров, что много меньше начального размера тела. За это же время плотность воздуха (и аэродинамические нагрузки) увеличится в несколько раз, т.е. за это время фрагменты метеороида могут испытать еще несколько фрагментаций. В результате тело превращается в груду мелких обломков, которые летят компактно. Если метеороид небольшой (около метра), то на таком же участке траектории фрагменты разойдутся на большое расстояние друг от друга и будут лететь независимо друг от друга. При этом независимые фрагменты тормозятся быстрее, чем летящие компактно.

Это принципиальное различие дает два принципиально разных сценария входа в атмосферу для маленьких (примерно менее 10 м) и больших (десятки метров и более) тел. Маленькие тела обычно испытывают первое разрушение (образование отдельных кусков) на высоте 40–50 км. Отдельные фрагменты быстро разлетаются, суммарная площадь поперечного сечения увеличивается, энергии воздуху передается больше, внешне это выглядит как вспышка. Мелкие фрагменты быстро тормозятся, один или несколько более крупных продолжают движение, пока не произойдет новое разрушение (из-за того, что плотность

воздуха и аэродинамические нагрузки все время увеличиваются) и новая вспышка. После нескольких разрушений и вспышек все фрагменты (которые после каждого разрушения становятся все меньше и меньше) тормозятся. Детально описать движение такого метеороида (например, Челябинского болида) теоретически практически невозможно потому, что моменты разрушений и количество и размеры образующихся кусков сильно зависят от индивидуальных особенностей начального тела, которые, во-первых, сильно отличаются у разных метеороидов, во-вторых, не могут быть определены заранее. Однако применение метода Монте-Карло позволяет воспроизводить уже случившиеся события [4].

Крупные тела успевают испытать много разрушений до того, как образующиеся фрагменты заметно разлетятся. При этом количество разрушений и их характеристики (т.е. индивидуальные особенности тел) не важны. В любом случае к моменту, когда тело начнет сильно деформироваться, оно уже будет сильно раздроблено. А сильно раздробленное тело можно в первом приближении рассматривать как жидкое потому, что оно легко деформируется. Модели движения в атмосфере таких квазижидких тел разработаны и были с успехом применены к описанию Тунгусской катастрофы [2, 5, 6] и падения кометы Шумейкеров-Леви 9 на Юпитер [7, 8].

Методы, применяемые для описания движения метеороидов в атмосфере

Простейшим подходом является описание вышеперечисленных явлений уравнениями движения точечной массы, т.е. системой обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих торможение, абляцию и разрушение (например, [9], [10]). Неизвестные коэффициенты сопротивления и абляции для этих уравнений можно найти в литературе или варьировать их для получения результатов, близких к наблюдаемым. Такой подход чаще всего используется в физике метеорных явлений, т.е. когда наблюдаются только вспышки в атмосфере, а само тело достигает поверхности земли со скоростью свободного падения в виде космической пыли или небольших метеоритов. Размер таких тел до входа в атмосферу не превышает нескольких метров.

При моделировании ударов крупных (100 м и больше) астероидов влиянием атмосферы вообще можно пренебречь – такие тела достигают поверхности земли с космической скоростью и создают ударные кратеры. Наиболее сложной проблемой является взаимодействие с атмосферой тел промежуточного размера, от первых метров до 100–200 м. В таких случаях для быстрых оценок можно использовать приближение точечной массы, но детальное описание процесса требует численного решения системы двух-трехмерных уравнений гидродинамики сплошных сред.

Для расчетов используется трехмерная многообластная двухшаговая программа SOVA [11]. На первом шаге решаются лагранжевы уравнения с помощью полностью консервативной разностной схемы второго порядка точности, аналогичной приведенной в [12]. На втором шаге проводится переинтерполяция данных с лагранжевой сетки на постоянную или движущуюся по заданному закону эйлерову сетку, для чего используется метод Ван Лира [13] второго порядка точности. Главной особенностью программы является явное выделение границ между областями, занятыми разными веществами или веществами в разных агрегатных состояниях (материал ударника, его пары, атмосфера). Для построения этих границ используется метод, описанный в [14]. По своим характеристикам программа SOVA близка к широко используемой в США программе CTH [14].

Моделирование Тунгуского явления

Взрыв 1908 г. в районе Подкаменной Тунгуски, зарегистрированный сейсмометрами во всем мире, вызвавший «белые ночи» в Европе, приведший к образованию вывала леса на территории 2000 км^2, продолжает привлекать внимание ученых всего мира главным образом потому, что до сих не найдено ни одного фрагмента космического тела, которое вызвало эту катастрофу. Именно этот факт позволяет обсуждать и даже публиковать многочисленные «альтернативные» гипотезы вплоть до самых фантастических. На самом деле, все наблюдавшиеся явления можно объяснить ударом по Земле космического тела (КТ) размером

порядка 60–100 м *(рис. 1)*. Такой разброс в размере объясняется тем, что наблюдающиеся эффекты зависят не только от размера, но и от скорости удара, угла входа КТ в атмосферу и его типа [6].

Вывал леса в виде бабочки был впервые воспроизведен в экспериментах [15] и позднее подтвержден многочисленными расчетами [16, 17]. Именно такую форму имеют контуры скорости ветра, возникающего в результате взаимодействия атмосферной ударной волны с поверхностью *(рис. 2)*. В «эпицентре» взрыва скорость «ветра» пренебрежимо мала, так как ударная волна падает точно сверху. Действительно, там найдены так называемые «телеграфные столбы» – уцелевшие, хотя и сильно обгоревшие деревья. Ветер (на самом деле – атмосферный газ за ударной волной) достигает максимальной скорости в 50–60 м/с (ураган третьей категории) на расстояниях 7–10 км от эпицентра.

Загадочное исчезновение материала ударника удалось понять и смоделировать сравнительно недавно, после наблюдений за падением кометы Шумейкера-Леви 9 на Юпитер и образованием гигантского атмосферного плюма, содержащего материалы кометы и газы из нижних слоев атмосферы [7,18]. По-видимому, такой же плюм образовался в атмосфере Земли после падения Тунгусского тела *(рис. 3)*.

В течение нескольких минут интенсивное движение газа вдоль следа вынесло на большие высоты частицы космического вещества и пары воды (примерно $1{,}6 \cdot 10^7$ кг) из тропосферы. Затем, под действием силы тяжести, частицы и кристаллы льда затормозились на высотах порядка 90 – 100 км, образовав гигантское облако диаметром ~2000 км [19]. Концентрация льда в этом облаке была сравнима с концентрацией воды в обычных серебристых облаках (20–200 мг/м^2). Дальнейшая эволюция облака определялась атмосферными течениями в

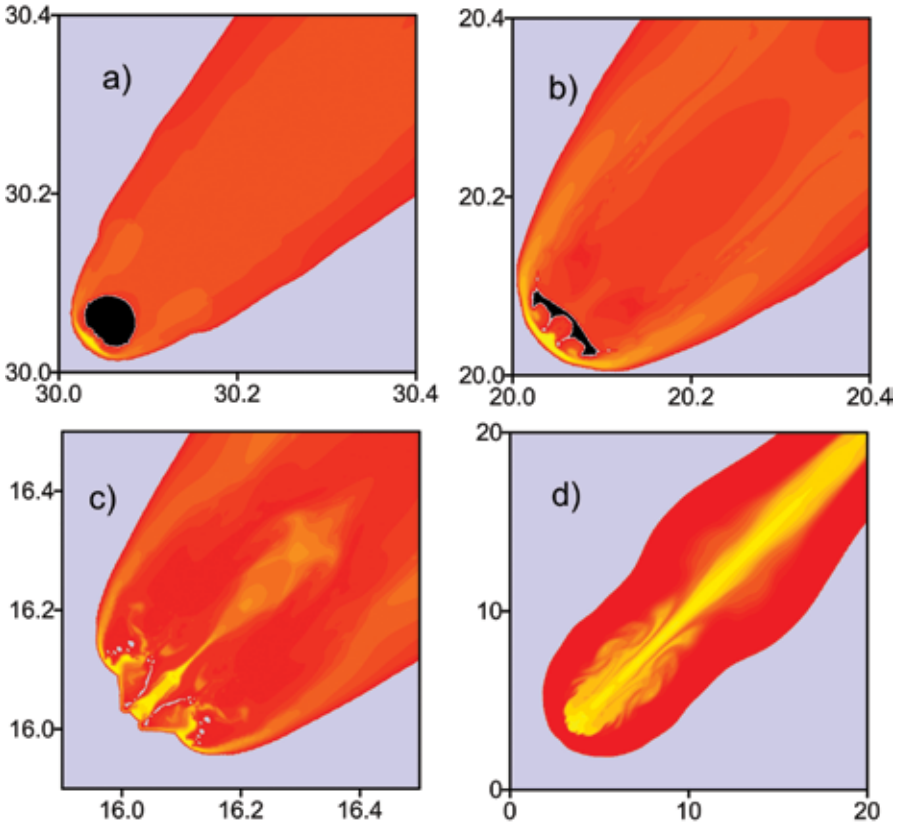


Рис. 1. *Взаимодействие ТКТ с атмосферой.*
a) на высоте 30 км начинается фрагментация;
b на высоте 20 км тело полностью разрушается и принимает сильно расплющенную форму с диаметром порядка 200 м;
c) на высоте 16 км в результате развития неустойчивостей тело превращается в струю частиц и пара, при этом его скорость по-прежнему близка к начальной скорости;
d) момент полного торможения струи, максимальная глубина проникновения космического вещества в атмосферу порядка 5 км

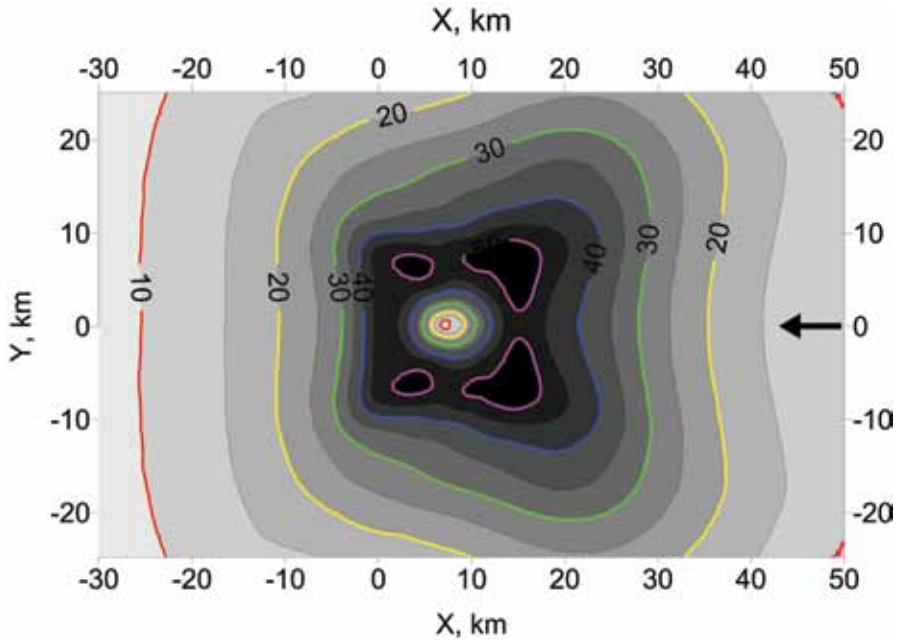


Рис 2. *Распределение скорости ветра на поверхности после удара ТКТ. Цифры около кривых показывают значение скорости ветра в м/с. Внутри фиолетового контура скорость ветра превышает 50 м/с*

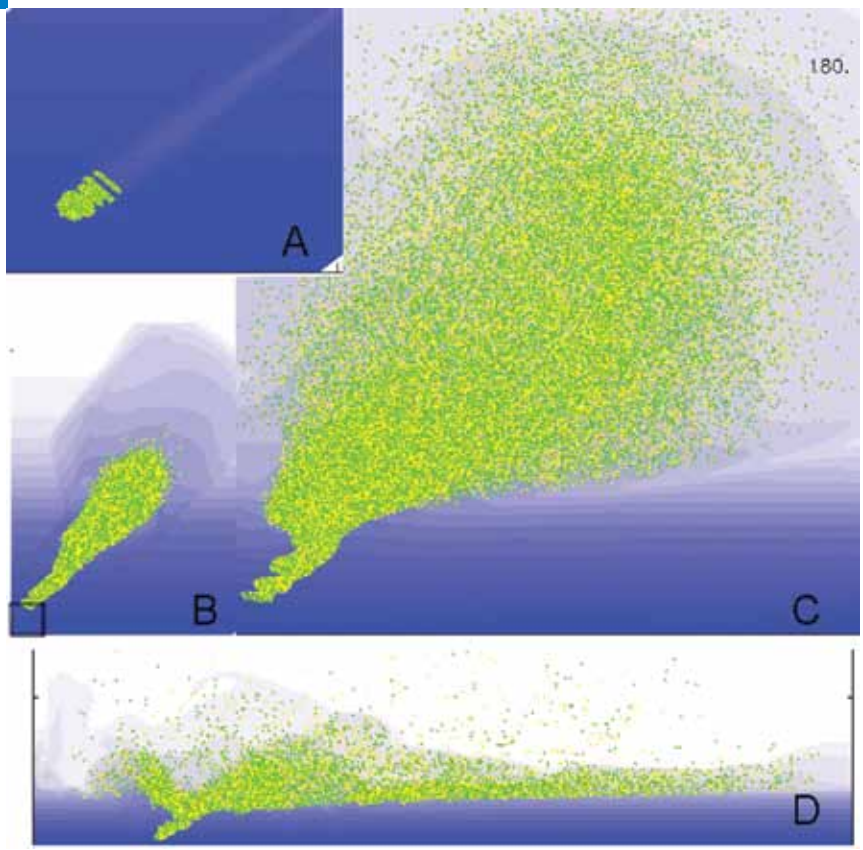


Рис 3. Эволюция внеземного вещества в плюме, образовавшемся после удара Тунгусского КТ.
a) момент полного торможения струи (как на рис. 1d);
b) быстрый подъем вещества вдоль следа;
c) через 3 минуты после удара плюм достиг своего максимального размера и занимает область порядка 400 км;
d) коллапс плюма, частицы тормозятся на высоте ~100 км, на этой высоте образуется облако диаметром 2000 км

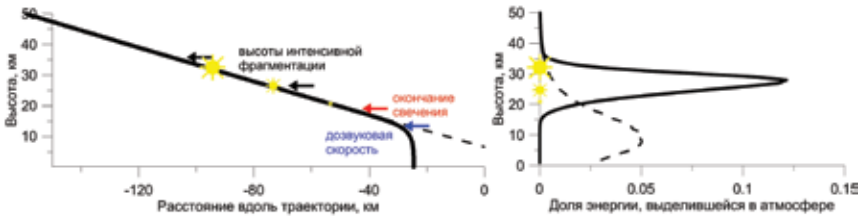


Рис 4. Траектория ЧМ (слева) и энерговыделение в атмосфере (справа), рассчитанные по модели точечной массы. Пунктирная линия показывает результаты без учета разрушения (в этом случае ЧМ достиг бы поверхности Земли со скоростью 6 км/с и образовал кратер размером порядка 300 м)

мезосфере, которые, скорее всего, перенесли его в северные широты Европы, образовав гигантское зеркало серебристых облаков. Похожие, хотя и существенно меньшие по размеру, облака и их быстрый дрейф в арктические широты наблюдались неоднократно при стартах космических шаттлов [20, 21].

Моделирование Челябинского болида

15 февраля 2013 г. тысячи людей наблюдали яркую вспышку в небе над Уралом. Через несколько минут на города Челябинской области обрушилась ударная волна, выбившая стекла в тысячах домов на общей площади в 5000 км^2 [22]. Осколками были ранены 1500 человек, несколько получили более тяжелые травмы. Благодаря многочисленным видео- и фотосъемкам, а также регистрации вспышки спутниковыми и наземными системами, удалось сравнительно быстро реконструировать сценарий этого события [23]: астероид размером 17–20 м вошел в атмосферу со скоростью 18,6 км/с под очень пологим углом в 17° (именно благодаря такой пологой траектории болид наблюдался на большой территории в течение нескольких секунд); он начал разрушаться на высоте порядка 40 км; болид достиг максимальной яркости на высоте 23,3 км. По данным спутниковых наблюдений (http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html) энергия этой вспышки составила 90 кт ТНТ (1 кт ТНТ равна $4{,}2 \cdot 10^{12}$ Дж), а полная начальная энергия КТ по разным данным колеблется от 300 до 900 кт ТНТ с наиболее вероятной величиной в 440 кт. Таким образом, это событие стало самым крупным после Тунгуски (10–20 Мт ТНТ).

Простейшая модель движения точечной массы позволяет неплохо воспроизвести траекторию движения метеороида и энерговыделение в атмосфере *(рис. 4)*, но не дает никакой информации об интенсивности ударных волн на поверхности. Поэтому были проведены простейшие двухмерные расчеты точечных взрывов разной мощности на разных высотах, которые позволили определить приблизительно зону избыточного давления 500 Па на поверхности. Именно при таком избыточном давлении, всего 0,5% от нормального атмосферного давления, начинается разрушение остекления [24]. Более сложная трехмерная модель учитывает «цилиндричность» энерговыделения в атмосфере. В этой модели энергия выделяется вдоль всего следа в соответствие с моделью точечной массы

(как на *рис. 4*) или согласно данным наблюдений [23]. Распространение ударных волн в атмосфере и их взаимодействие с поверхностью (Маховское отражение) показаны на *рис. 5*, а контуры избыточного давления на поверхности – на *рис. 6*.

После падения Челябинского метеорита найдено примерно 1000 кг фрагментов, т.е. меньше 0,01% от начальной массы. И даже предполагаемый «главный» фрагмент, недавно найденный в оз. Чебаркуль, не может существенно изменить эту оценку. По-видимому, абляция крупных тел типа Челябинска и Тунгуски имеет более интенсивный характер и приводит практически к полной потере космического вещества. Если в случае Тунгуски это вещество было рассеяно плюмом, то в случае Челябинска, когда образование плюма не наблюдалось и вообще вряд ли было возможно из-за меньшего размера метеороида и очень малого угла наклона траектории, материал ударника остался в «дымном» следе, который дрейфовал в земной атмосфере несколько месяцев [25].

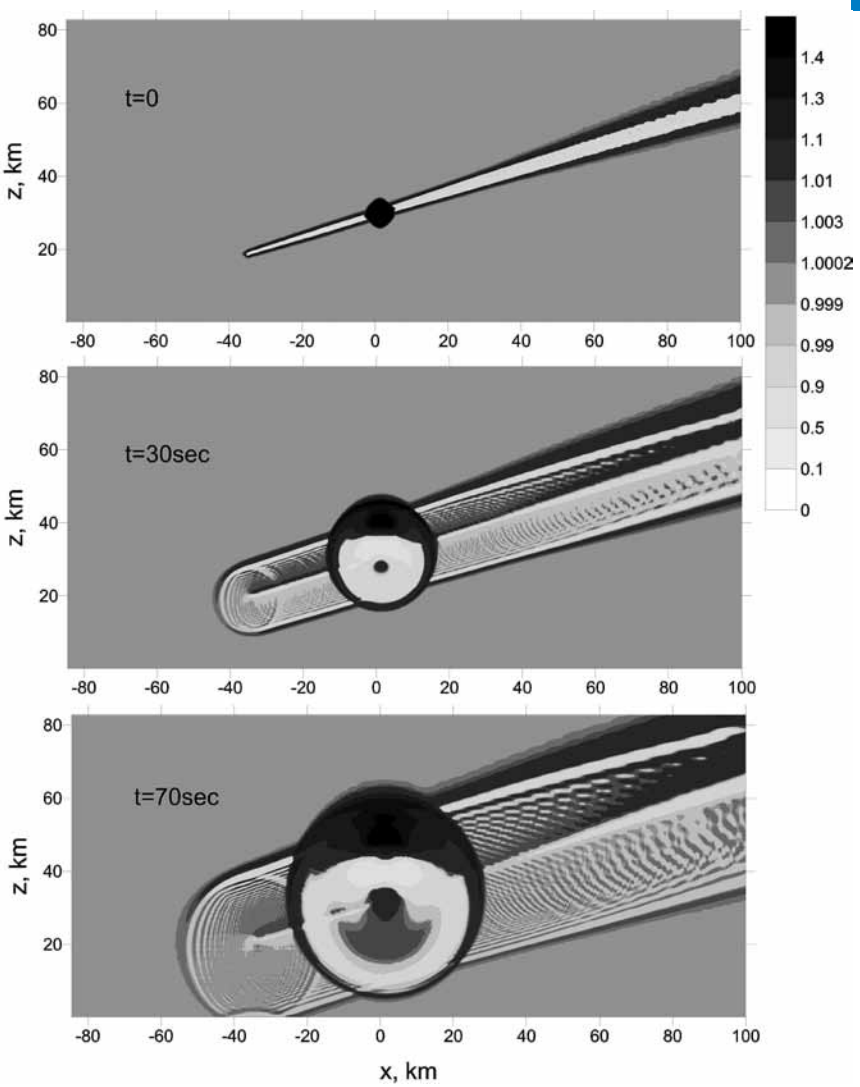


Рис 5. Распределения давления в разные моменты времени t при падении Челябинского метеорита. Предполагалось, что 95% энергии выделилось в момент основной вспышки, остальные 5% – равномерно вдоль траектории. Видно, что время прихода возмущения в разные точки поверхности Земли зависит не от основной вспышки, а от непрерывного выделения энергии вдоль траектории как при цилиндрическом взрыве

Обсуждение

Падение Челябинского метеорита в густонаселенном промышленном районе подтверждает предсказание важной роли «малых» ударов в жизни современной цивилизации [26]. Во-первых, такие удары случаются относительно часто, раз в 100–1000 лет [27]. В-вторых, тела такого размера (меньше 100 м) не могут, как правило, быть обнаружены заранее, в отличие от км-астероидов. Известен единственный случай обнаружения 4-м астероида 2008 TC3 за сутки до его столкновения с Землей [28]. В-третьих, даже разрушаясь в атмосфере, такие тела могут привести к серьезным последствиям на земле на больших площадях [29]. В-четвертых, последствия удара в «чувствительную» точку современной цивилизации (плотину, атомную электростан-

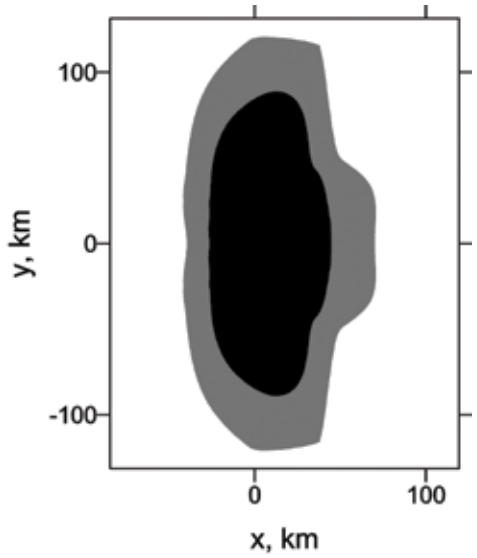


Рис 6. Распределение максимального избыточного давления на поверхности Земли после падения Челябинского метеорита. Черным цветом отмечена область, где давление превышало 1000 Па, серым – 500 Па

цию, химический завод) могут на порядки превысить стандартные «механические» эффекты. В-пятых, падение таких тел может привести к нарушению современных телекоммуникационных систем, включая системы навигации.

Еще один важный урок Челябинского события – отсутствие у населения элементарных знаний о метеороидах, ударных волнах и т.д. Соблюдение минимальных мер предосторожности (держаться подальше от окон после яркой вспышки в небе) могло бы предотвратить большое количество травм на месте падения Челябинского метеорита. По-видимому, описание такого события должно войти в школьные курсы физики.

Литература

1. ***Passey Q.R., Melosh H.J.***
Effects of atmospheric breakup on crater field formation // Icarus. – 1980. – V. 42, N 2. – P. 211–233.
2. ***Chyba C., Thomas P.J., Zahnle K.J.***
The 1908 Tunguska explosion: Atmospheric disruption of a stony asteroid // Nature. – 1993. – V. 361. – P. 40–44.
3. ***Artem'eva N.A., Shuvalov V.V.***
Interaction of shock waves during the passage of disrupted meteoroid through atmosphere // Shock waves. – 1996. – V.5, No.6. – P. 359–367.
4. ***Artemieva N.A., Shuvalov V.V.***
Motion of a fragmented meteoroid through the planetary atmosphere // Journal of Geophysical Research. – 2001. – V. 106. – P. 3297–3309.
5. ***Shuvalov V.V., Artemieva N.A.***
Numerical modeling of Tunguska-like impacts // Planetary and Space Science. – 2002. – V. 50. – P. 181–192.
6. ***Шувалов В.В., Трубецкая И.А.***
Гигантские болиды в атмосфере Земли // Астрономический вестник. – 2007. – Т. 41. – С. 241–251.
7. ***Crawford D.A., Boslough M.B., Trucano T.G., Robinson A.C.***
The impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter // Shock waves. – 1994. – V. 4. – P. 47–50.
8. ***ShuvalovV.V., Artem'eva N.A., Kosarev I.B.***
3D hydrodynamic code SOVA for multimaterial flows, application to Shoemaker-Levy 9 comet impact problem // International Journal of Impact Engineering. – 1999. – V. 23. – P. 847–858.
9. ***Bland P.A., Artemieva N.A.***
The rate of small impacts on Earth // Meteoritics and Planetary Science. – 2006. – V. 41. – P. 607–631.
10. ***Ceplecha Z., Spurný P., Borovička J., Keclíková J.***
Atmospheric fragmentation of meteoroids //Astronomy and Astrophysics. – 1993. – V. 279. – P. 615–626.
11. ***Shuvalov V.V.***
Mult-dimensional hydrocode SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // Shock Waves. – 1999. – V. 9. – P. 381–390.
12. ***Самарский А.А., Попов Ю.Г.***
Разностные методы решения задач газовой динамики. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
13. ***Van Leer B.***
Towards the ultimate conservative difference scheme IV. A new approach to numerical convection // Journal of Computational Physics. – 1977. – V. 23. – P. 276–299.
14. ***McGlaun J.M., Thompson S.L., Elrick M.G.***
A three-dimensional shock wave physics code // International Journal of impact Engineering. – 1990. – V. 10. – P. 351–360.
15. ***Зоткин И.Ф., Цикулин М.А.***
Моделирование Тунгусского метеоритного взрыва // Доклады АН СССР. – 1966. – Т. 167. – С. 59–62.
16. ***Boslough M., Crawford D.***
Shoemaker-Levy 9 and plume forming collisions on Earth // Annals of the New York Academy of Sciences. – 1997. – V. 822. – P. 236–280.
17. ***Artemieva N, Shuvalov V.***
3D effects of Tunguska event on the gorund and in atmosphere // Lunar and Planetary Science Conference-38. – 2007. – Abstr. 1537.
18. ***Hammel H.B. and 16 co-authors.***
HST imaging of atmospheric phenomena created by the impact of comet Shoemaker-Levy 9 // Science. – 1995. – V. 267. – P. 1288–1296.
19. ***Artemieva N, Shuvalov V.***
Tunguska Explosion – Final Remarks // Lunar and Planetary Science Conference-41. – 2010. – Abstr. 1268.
20. ***Stevens M.H., Gumbel J., Englert C.R., Grossman K.U., Rapp M., Hartogh P.***
Polar mesospheric clouds formed from space shuttle exhaust // Geophysical Research Letters. – 2003. – V. 30. – Doi: 10.1029/2003GL017249.
21. ***Kelley M.C., Seyler C.E., Larsen M.F.***
Two-dimensional turbulence, space shuttle plume transport in the thermosphere, and a possible relation to the Great Siberian impact event // Geophysical Research Letters. – 2009. – V. 36. – Doi:10.1029GL038362.
22. ***Емельяненко В.В., Попова О.П, Чугай Н.Н., Шеляков М.А., Пахомов Ю.В., Шустов Б.М., Шувалов В.В., Бирюков Е.Е., Рыбнов Ю.С., Маров М.Я., Рыхлова Л.В., Нароенков С.А., Карташова А.П., Харламов В.А., Трубецкая И.А.***
Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический вестник. – 2013. – Т. 47. – С. 262–277.
23. ***Borovicka J., Spurny P., Shrbeny L.***
Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide, in Electronic Telegram, Cambridge, MA: Central Bureau Electronic Telegrams. – Int. Astron. – Union. – 2013, no. 3423.
24. ***Brown M.D., Loewe A.S.***
Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks against Buildings. – FEMA. – 2003. – PP. 4–19.
25. ***Gorkavyi N., Rault D.F., Newman P.A., da Silva A.M., Dudorov A.E.***
New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide // Geophysical Research Letters. – 2013. accepted. – DOI:10.1002/grl.50788
26. ***Немчинов И.В., Светцов В.В., Шувалов В.В.***
Основные факторы астероидной опасности // Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. Адушкина В.В., Немчинова И.В. – М.: ИКЦ Академкнига. – 2005. – С. 12–61.
27. ***Brown P.G., Spalding R.E., ReVelle D.O., Tagliaferri E., Worden S.P.***
The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature. – 2002. – V. 420. – P. 294–296.
28. ***Jenniskens P. and 34 co-authors.***
The impact and recovery of asteroid 2008 TC3 // Nature. – 2009. – V. 458. – P. 485–488.
29. ***Шувалов В.В., Светцов В.В., Трубецкая И.А.***
Оценка размера зоны разрушений, производимых на поверхности земли ударами астероидов размером 10–300 м // Астрономический вестник. – 2013. – Т. 47. – С. 284–291.

English

Physical Phenomena at the Fall of the Small Space Bodies on the Ground and their Modelling*

Valery V. Shuvalov –
PHD, Head of laboratory Institute of geospheres dynamics RAS
38 Leninsky pr. bld.1, Moscow, 119334, Russia
e-mail: shuvalov@idg.chph.ras.ru

Natalia A. Artemieva –
PHD, Senior reseacher Institute of geospheres dynamics RAS
38 Leninsky pr. bld.1, Moscow, 119334, Russia
e-mail: natalia.artemeva@gmail.com

Abstract

The paper describes physical processes such as deceleration, ablation, and fragmentation that accompany the entry of cosmic bodies into the Earth's atmosphere. Applicable mathematical methods are also presented. The entry of an 80-m-diameter asteroid allows to explain all observed enigmatic effects of the Tunguska event – butterfly-shaped forest fallout, white nights in Europe, and absence of extraterrestrial materials at the impact site. The Chelyabinsk meteoroid is 4–5 times smaller in size. However, bow shock waves are strong enough to destroy windows within an area of 2000 km^2. Intermediate-sized bodies (10–100 m in diameter) are the most dangerous cosmic objects for modern civilization. Their impacts occur every 100–1000 years and cannot be predicted in advance; although they cannot reach the surface, damaged area may exceed 1000 sq.km.

Keywords: asteroid, atmosphere, ablation, fragmentation, energy release, mathematical model, Tunguska cosmic body, Chelyabinsk meteoroid, impact hazard.

References

1. ***Passey Q.R., Melosh H.J.***
Effects of atmospheric breakup on crater field formation // Icarus. – 1980. – V. 42, N 2. – P. 211–233.
2. ***Chyba C., Thomas P.J., Zahnle K.J.***
The 1908 Tunguska explosion: Atmospheric disruption of a stony asteroid // Nature. – 1993. – V. 361. – P. 40–44.
3. ***Artem'eva N.A., Shuvalov V.V.***
Interaction of shock waves during the passage of disrupted meteoroid through atmosphere // Shock waves. – 1996. – V.5, No.6. – P. 359–367.
4. ***Artemieva N.A., Shuvalov V.V.***
Motion of a fragmented meteoroid through the planetary atmosphere // Journal of Geophysical Research. – 2001. – V. 106. – P. 3297–3309.
5. ***Shuvalov V.V., Artemieva N.A.***
Numerical modeling of Tunguska-like impacts // Planetary and Space Science. – 2002. – V. 50. – P. 181–192.
6. ***Shuvalov V.V., Trubetskaya I.A.***
Aerial bursts in the terrestrial atmosphere // Solar System Research. – 2007. – Vol. 41, No. 3. – PP. 220–230.
7. ***Crawford D.A., Boslough M.B., Trucano T.G., Robinson A.C.***
The impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter // Shock waves. – 1994. – V. 4. – P. 47–50.
8. ***Shuvalov V.V., Artem'eva N.A., Kosarev I.B.***
3D hydrodynamic code SOVA for multimaterial flows, application to Shoemaker-Levy 9 comet impact problem // International Journal of Impact Engineering. – 1999. – V. 23. – P. 847–858.
9. ***Bland P.A., Artemieva N.A.***
The rate of small impacts on Earth // Meteoritics and Planetary Science. – 2006. – V. 41. – P. 607–631.
10. ***Ceplecha Z., Spurný P., Borovička J., Keclíková J.***
Atmospheric fragmentation of meteoroids //Astronomy and Astrophysics. – 1993. – V. 279. – P. 615–626.
11. ***Shuvalov V.V.***
Mult-dimensional hydrocode SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // Shock Waves. – 1999. – V. 9. – P. 381–390.
12. ***Samarsky A.A., Popov Yu.P.***
Finite Difference Methods for Gas Dynamic Problems. Moscow: Nauka. – 1980. – 352 p.
13. ***Van Leer B.***
Towards the ultimate conservative difference scheme IV. A new approach to numerical convection // Journal of Computational Physics. – 1977. – V. 23. – P. 276–299.
14. ***McGlaun J.M., Thompson S.L., Elrick M.G.***
A three-dimensional shock wave physics code // International Journal of impact Engineering. – 1990. – V. 10. – P. 351–360.
15. ***Zotkin I.F., Tsikulin M.A.***
Modeling of the Tunguska meteorit explosion // DAN SSSR. – 1966. – V. 167. – P. 59–62
16. ***Boslough M., Crawford D.***
Shoemaker-Levy 9 and plume forming collisions on Earth // Annals of the New York Academy of Sciences. – 1997. – V. 822. – P. 236–280.
17. ***Artemieva N, Shuvalov V.***
3D effects of Tunguska event on the gorund and in atmosphere // Lunar and Planetary Science Conference-38. – 2007. – Abstr. 1537.
18. ***Hammel H.B. and 16 co-authors.***
HST imaging of atmospheric phenomena created by the impact of comet Shoemaker-Levy 9 // Science. – 1995. – V. 267. – P. 1288–1296.
19. ***Artemieva N, Shuvalov V.***
Tunguska Explosion – Final Remarks // Lunar and Planetary Science Conference-41. – 2010. – Abstr. 1268.
20. ***Stevens M.H., Gumbel J., Englert C.R., Grossman K.U., Rapp M., Hartogh P.***
Polar mesospheric clouds formed from space shuttle exhaust // Geophysical Research Letters. – 2003. – V. 30. – Doi: 10.1029/2003GL017249.
21. ***Kelley M.C., Seyler C.E., Larsen M.F.***
Two-dimensional turbulence, space shuttle plume transport in the thermosphere, and a possible relation to the Great Siberian impact event // Geophysical Research Letters. – 2009. – V. 36. – Doi:10.1029GL038362.
22. ***Emel'yanenko V.V., Popova O.P., Chugai N.N., Shelyakov M.A., Pakhomov Yu.V., Shustov B.M., Shuvalov V.V., Biryukov E.E., Rybnov Yu.S., Marov V., Rykhlova L.V., Naroenkov S.A., Kartashova A.P., Kharlamov V.A., and Trubetskaya I.A.***
Astronomical and Physical Aspects of the Chelyabinsk Event (February 15, 2013) // Solar System Research. – 2013. – Vol. 47, № 4. – P 240–254.
23. ***Borovicka J., Spurny P., Shrbeny L.***
Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide, in Electronic Telegram, Cambridge, MA: Central Bureau Electronic Telegrams. – Int. Astron. – Union. – 2013, no. 3423.
24. ***Brown M.D., Loewe A.S.***
Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks against Buildings. – FEMA. – 2003. – PP. 4–19.
25. ***Gorkavyi N., Rault D.F., Newman P.A., da Silva A.M., Dudorov A.E.***
New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide // Geophysical Research Letters. – 2013. accepted. – DOI:10.1002/grl.50788
26. ***Nemchinov I., Shuvalov V., and Svetsov V.***
Main Factors of Hazards Due to Comets and Asteroids // Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects / Edited by Adushkin V. and Nemchinov I. Berlin: Springer. – 2008. – P. 1–90.
27. ***Brown P.G., Spalding R.E., ReVelle D.O., Tagliaferri E., Worden S.P.***
The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature. – 2002. – V. 420. – P. 294–296.
28. ***Jenniskens P. and 34 co-authors.***
The impact and recovery of asteroid 2008 TC3 // Nature. – 2009. – V. 458. – P. 485–488.
29. ***Shuvalov V.V., Svettsov V.V. and Trubetskaya I.A.***
An Estimate for the Size of the Area of Damage on the Earth's Surface after Impacts of 10–300-m Asteroids // Solar System Research. – 2013. – Vol. 47, No. 4. – P. 260–267.

* *The work was financially supported by RFBR (project №13-05-00309)*

Широкоугольный оптический мониторинг высокого временного разрешения как способ обнаружения опасных космических объектов*

Бескин Г.М, Карпов С.В, Плохотниченко В.Л, Бондарь С.Ф, Перков А.В, Иванов Е.А, Каткова Е.В, Сасюк В.В, Шерер. Э.

Предлагается использовать многоканальные оптические системы с приемниками субсекундного временного разрешения для обнаружения и изучения опасных космических тел естественного и искусственного происхождения. Сконструированы два инструмента Мини-МегаТОРТОРА (с 6-ю и 9-ю объективами), функционирующие в двух режимах: мониторинговом (поля зрения 600 и 900 кв.градус) и исследовательском (поле зрения – 100 кв.градусов). Во втором режиме все объективы ориентированы на одно поле, в котором находится обнаруженный при мониторинге быстродвижущийся объект. Смена поля зрения за доли секунды обеспечивается поворотами плоских зеркал, расположенных перед объективами, а измерение цвета и поляризации – набором фильтров и поляроидов. Приводятся некоторые детали конструкции приборов, их характеристики, параметры обнаруживаемых объектов. В качестве развития систем такого типа рассматривается проект комплекса из нескольких сотен телескопов диаметром 40 см и полем зрения 1 кв.градус.

Ключевые слова: оптический мониторинг, фотометрия, опасные космические объекты.

** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 04–02–17 555, 06–02–08313, 09–02–12053 и 12–02–00743)*

Введение

Впервые проблему поиска и исследования быстропеременных (транзиентных) во времени и пространстве оптических объектов отчетливо сформулировал Г. Бонди в 1970 г. [1], отметив важность поисков нестационарных объектов неизвестной заранее локализации. Для их изучения необходимы широкоугольные инструменты (с полем зрения в сотни квадратных градусов), использующие детекторы как минимум субсекундного временного разрешения. Малая длительность (вплоть до 0,01 с) транзиентов (вспышки звезд типа UV Кита,

БЕСКИН
Григорий Меерович
доктор физико-математических наук, руководитель группы Специальной астрофизической обсерватории РАН.

КАРПОВ
Сергей Валентинович
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Специальной астрофизической обсерватории РАН.

ПЛОХОТНИЧЕНКО
Владимир Леонидович
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Специальной астрофизической обсерватории РАН.

БОНДАРЬ
Сергей Федорович
технический директор филиала ОАО НПК СПП «СОН Архыз».

ПЕРКОВ
Алексей Викторович
ведущий инженер филиала ОАО НПК СПП «СОН Архыз».

ИВАНОВ
Евгений Александрович
начальник сектора филиала ОАО НПК СПП «СОН Архыз».

КАТКОВА
Елена Валентиновна
начальник группы филиала ОАО НПК СПП «СОН Архыз».

САСЮК
Вячеслав Васильевич
кандидат технических наук, зав. отделом Казанского федерального университета.

ШЕРЕР
Эндрю
PhD, директор центра астрономии Национального университета Ирландии.

гамма-всплески, передние фронты вспышек сверхновых и новых звезд) и/или большие скорости (до десятков градусов в секунду) их движения (спутники, космический мусор, метеоры и болиды) определяют важность такого высокого временного разрешения [2]. Объекты исследований перечислены в *табл. 1*, будучи сортированными по локализации и длительности.

Для реализации широкопольного мониторинга высокого временного разрешения необходимо сочетание изначально взаимнопротиворечивых требований: достаточно высокого предела обнаружения (большой диаметр объектива), широкого поля зрения (короткий фокус) и высокого временного разрешения (небольшой размер детектора). Необходимо достижение разумного компромисса. Соотношение этих условий было оптимизировано в проекте широкопольной камеры с объективом относительно малого диаметра, электронно-оптическим преобразователем для эффективного сокращения фокуса и быстрой малошумящей ПЗС-матрицей [2]. Первая версия прибора, FAVOR (FAst Variability Optical Registrator), начала наблюдения в 2003 г. поблизости от 6-м телескопа БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН [3, 4]. Аналогичная по конструкции камера TORTORA (Telescopio Ottimizzato per la Ricerca dei Transienti Ottici RApidi) [5] установлена в 2006 г. на монтировке роботического телескопа REM [6] в обсерватории La-Silla (ESO, Чили). При диаметрах объективов 15 и 12 см (светосиле 1:1,2) и полях зрения 400–800 кв.градусов пределы обнаружения этих систем близки к 10–11 зв. вел. в B-полосе за время экспозиции 0,13 с (частота кадров ПЗС-матрицы – 7,5 Гц).

В конечном итоге камера TORTORA обнаружила оптическое излучение, синхронное с гамма-эмиссией, у самого яркого из известных на данный момент гамма-всплеска GRB080319B. При этом впервые была открыта переменность транзиента такого типа на секундной временной шкале и проведено сопоставление ее параметров с таковыми в гамма-диапазоне [7, 8, 9].

Таблица 1. Оптические транзиенты различных типов

Время	Околоземное пространство	Галактика	Внегалактика и космологические расстояния
< 0.1 с	метеоры, спутники, космический мусор, высокоатмосферные явления	новые, вспыхивающие звезды, покрытия звезд	гамма-всплески, близкие сверхновые
1 с	высокоорбитальные спутники		
10 с			
100 с	астероиды		
> 1000 с		переменные звезды, MACHO-события	активные ядра галактик, сверхновые

Серым фоном отмечены классы объектов, на постоянной основе исследуемые существующими широкопольными экспериментами, такими, как ASAS, LINEAR, MACHO итд

С помощью камер FAVOR и TORTORA также впервые удавалось регистрировать быстродвижущиеся спутники и метеоры с яркостью на уровне 9–10 зв.вел. [10].

Наблюдательные проявления объектов такого типа характерны и для более крупных, внезапно вошедших в атмосферу Земли метеороидов, подобных Чебаркульскому метеориту. Эти компоненты Солнечной системы представляются особо опасными из-за неожиданности их появления и, как следствие, отсутствия информации о возможном поведении.

Действительно, астероидно-кометная опасность в первую очередь обуславливается возможным столкновением с Землей космических тел размерами в сотни–тысячи метров. Например, в рамках программы Spaceguard Survey, проводившейся в 1998–2009 г.г., каталогизированы свыше 8000 космических тел, сближающихся с Землей (ОСЗ), чьи размеры превышают 1 км. В их число входят потенциально опасные объекты (ПОО) – более тысячи астероидов и около 70 комет [11]. Впрочем, выборка даже таких крупных тел еще неполна – несколько десятков до сих пор не обнаружены. В то же время более 90% (10000) и 99% (100000) пятидесятиметровых и стометровых тел, соответственно, не зарегистрированы [11]. Невозможно прогнозировать и появление вблизи Земли фрагментов распавшихся долгопериодических комет, движущихся с большими скоростями. Хоть их число невелико, однако последствия их внезапного столкновения с Землей могут носить глобальный характер.

Отметим, наконец, что около половины внезапных появлений опасных объектов приходится на дневное время, – они частично могут обнаруживаться только при наблюдениях из космоса.

В настоящее время в мире нет оптических телескопов, способных систематически обнаруживать и изучать упомянутые относительно небольшие (50–100 м в диаметре) ПОО (см., например, [11]). По-видимому,

несколько таких инструментов будут введены в эксплуатацию после 2015 г. Речь, прежде всего, идет о 4-х телескопах диаметром 1,8 м проекта Pan-STARRS и о 8-метровом LSST [12, 13]. Эти инструменты с полями зрения около 9 кв.градусов при экспозициях в 30 и 15 секунд должны иметь пределы обнаружения около 24–25 зв.вел. и будут проводить обзор небесной полусферы за несколько ночей. Тем не менее ясно, что они не смогут обнаруживать внезапно появляющиеся в произвольном месте быстродвижущиеся объекты.

Для решения такой задачи необходимы телескопы с полем зрения в сотни (лучше тысячи!) квадратных градусов (в идеале необходимо наблюдать одновременно всю небесную полусферу) и высоким временным разрешением. Более того, такой прибор должен быть способен как можно быстрее после обнаружения измерить скорость транзиента, его цвета, поляризацию, определить параметры переменности. Все это необходимо для прогнозирования эволюции тела, – не только кинематической (траектория движения), но и физической (с использованием данных о массе, плотности, составе, степени устойчивости).

Представляется, что разработанные нами многоканальные системы высокого временного разрешения Mini-MegaTORTORA (естественное развитие проектов FAVOR и TORTORA) способны регистрировать и исследовать быстродвижущиеся, появляющиеся внезапно, опасные метеороиды.

Многоканальная широкоугольная мониторинговая система Mini-MegaTORTORA

Опыт эксплуатации камер FAVOR и TORTORA позволил определить направления дальнейшего развития методологии широкоугольного поиска быстрых оптических транзиентов. Прежде всего, надо повысить проницание инструментов как минимум на 2–3 звездных величины при сохранении или даже увеличении размера их поля зрения. Для этого необходимо перейти к многообъективным (многотелескопным) конфигурациям с уменьшением поля зрения отдельного инструмента (увеличением его углового разрешения) при сохранении (как минимум) полного поля зрения [14]. С другой стороны, для соблюдения условия доминирования шума неба относительно шума приемника нужно увеличивать его квантовый выход и/или использовать малошумящие детекторы (матрицы с внутренним усилением, sCMOS-приемники). Вторым важным направлением развития является измерение цветов и поляризации обнаруженных транзиентов сразу после их регистрации.

Система Mini-MegaTORTORA (ММТ) состоит из набора (6 или 9) отдельных каналов-объективов *(рис. 1а)*, установленных попарно на экваториальных монтировках *(рис. 1б)*. Перед каждым объективом расположено плоское зеркало, поворачивающееся вокруг двух осей на ±20 градусов, тем самым меняя расположение поля

Рис. 1б. Общий вид отдельной монтировки системы ММТ

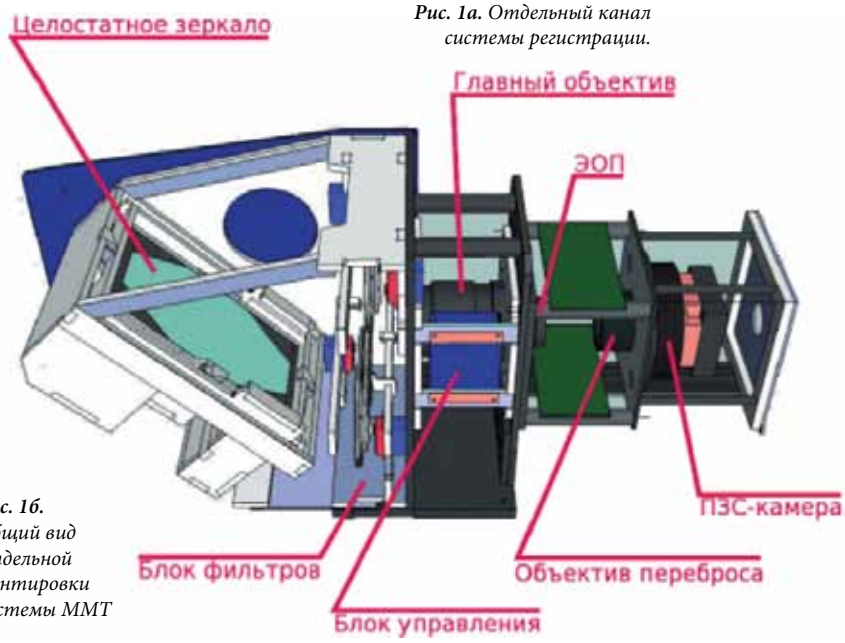


Рис. 1а. Отдельный канал системы регистрации.

зрения каждого канала на небесной сфере. Кроме того, каждый объектив снабжен набором цветовых и поляризационных фильтров, которые могут вводиться в световой пучок в процессе наблюдений. Это позволяет быстро переходить от широкопольного мониторинга без фильтров к узкопольным наблюдениям, когда все объективы направлены на одну область, содержащую только что обнаруженный транзиент, и регистрируют ее во всех возможных комбинациях цветовых и поляризационных фильтров *(рис. 2)*. Одновременное наблюдение транзиента всеми объективами в одном фильтре также возможно для повышения точности фотометрии.

Каждый объектив снабжен детектором с высоким временным разрешением (комбинация ЭОПа и быстрой матрицы либо sCMOS). Технические параметры канала для первой конфигурации приведены в *таблице 2*. Управление системой в целом и анализ получаемых с нее данных в реальном времени осуществляется программным обеспечением, аналогичным использовавшемуся в камерах FAVOR и TORTORA [3, 4, 5].

В настоящее время завершается изготовление и пробная эксплуатация 6-канальной версии (ММТ-6) с комбинированным детектором и 9-канального варианта (ММТ-9) с sCMOS-детектором Andor Neo Scmos, – прибор при этом упрощается и не содержит ЭОП и объектив переброса *(рис. 1а)*.

Одиночный канал имеет поле зрения около 100 кв.градусов, а системы ММТ-6 и ММТ-9 в широкопольном мониторинговом режиме – около 600 и 900 кв.градусов, соответственно. Пределы обнаружения в В-полосе составляют для ММТ-6 – 11,5 зв.вел. за 0,13 с (14 и 16,5 зв.вел. за 13 и 1300 с), а для ММТ-9 – 12 зв.вел. за 0,1 с (14,5 и 17 зв.вел за 10 и 1000 с). В исследовательском (follow-up) режиме узкого поля при наблюдениях отдельных объектов размер поля зрения уменьшается до 100 кв.градусов, а предельная звездная величина зависит от выбора комбинации спектральных и поляризационных фильтров и лежит в диапазоне 10,5–13,5 зв.вел. за 0,13 или 0,1 с, достигая 18 зв.вел. за 1000–1300 с.

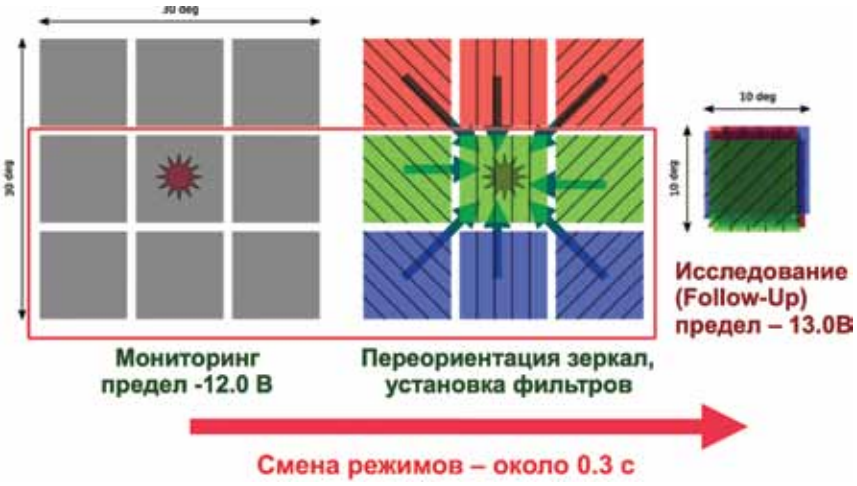


Рис. 2. Различные режимы функционирования систем ММТ-9 и ММТ-6. Слева – режим широкопольного мониторинга в белом цвете либо в одном из цветовых фильтров. Посередине – введение в световой пучок цветовых и поляризационных фильтров как первый шаг после обнаружения оптического транзиента. Справа – перенаведение всех объективов на поле, содержащее транзиент, для получения информации о нем в трех (двух) различных фотометрических полосах при трех ориентациях плоскости поляризации (показанных различными направлениями штриховки) одновременно. Точное время, необходимое для перехода из одного режима в другой, зависит от аппаратной конфигурации, но ожидается, что оно не будет превосходить 0,3 с

Введение в строй системы ММТ-6 планируется на конец 2013 г.; прибор будет установлен вблизи 6-метрового телескопа САО РАН. ММТ-9 изготавливается в сотрудничестве с Казанским (Приволжским) Федеральным Университетом и ООО «Параллакс» и будет введен в эксплуатацию в обсерватории имени Энгельгардта (Казань) в 2014 г. Оба инструмента создаются при поддержке проекта Европейского Союза ГЛОРИЯ (грант №283783) и будут функционировать в том числе и в его рамках (gloria-project.eu).

Возможности систем Mini-MegaTORTORA при обнаружении опасных метеороидов

При 15-минутной экспозиции в каждом положении девятиканальная система Mini-MegaTORTORA в течение ночи средней длительности (8–9 часов) обозревает небесную полусферу полтора раза, т.е. половина неба наблюдается дважды с интервалом 6 часов. Движущиеся транзиенты, локализованные в этой области, могут быть обнаружены по собственному движению. Тем не менее основным способом выделения вновь появившихся объектов является сравнение положения любого видимого объекта с координатами всех источников из всех каталогов. Специализированное материальное обеспечение позволяет провести эту процедуру за 0,2–0,4 с и перейти за такое же время в исследовательский режим для измерений цвета и поляризации транзиента. Анализ

Таблица 2. Технические параметры отдельного канала Mini-MegaTORTORA

Главный объектив		ЭОП		ПЗС-матрица	
Диаметр	71 мм	Фотокатод	GaAs	Модель	SONY 2/3" IXL285interline
Фокус	85 мм	Диаметр	17.5 мм	Размеры	1388x1036 пикселей
D/F	1/1.2	Усиление	40000	Масштаб	30 – 40"/пиксель
Поле зрения	10x10 град	Масштабирование	1/1	Экспозиция	0.128–10 секунд
		Квантовый выход	30% на 4500A	Размер пикселя	6.45 мкм

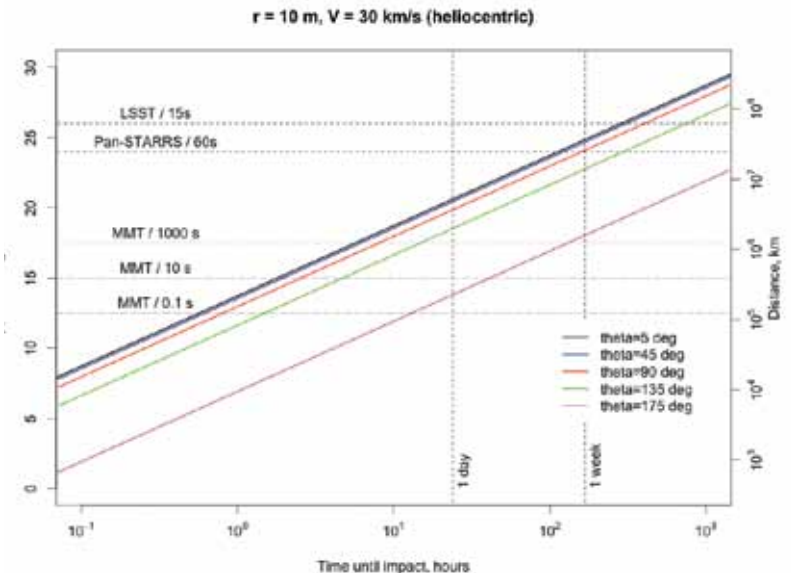


Рисунок 3. Связь между блеском объекта типа Челябинского метеорита (диаметр 20 м, типичное для хондритов альбедо 0,08), имеющего гелиоцентрическую скорость 30 км/с (параметр графика T определяет угол пересечения его траекторией орбиты Земли), со временем, оставшимся до столкновения. Горизонтальные линии соответствуют пределам обнаружения у различных мониторинговых систем, там же приведены их времена экспозиции.

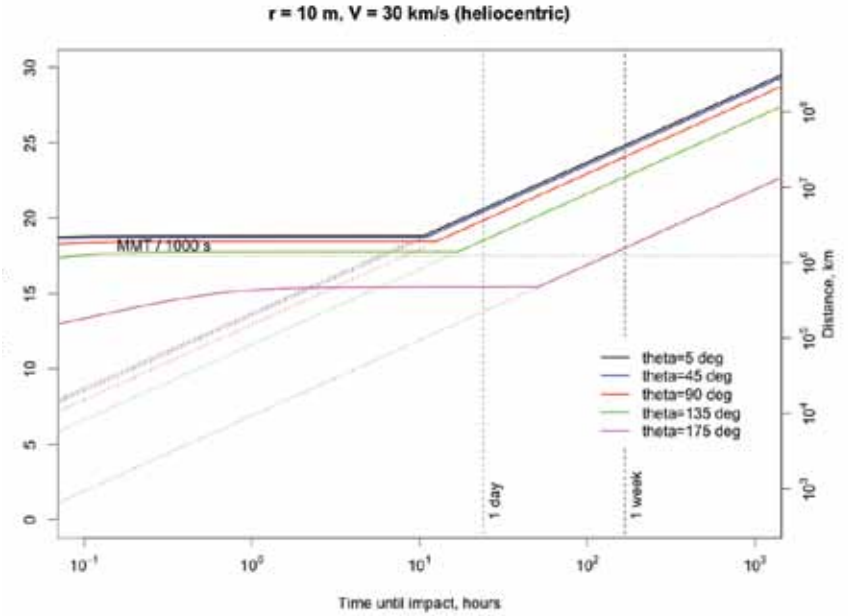


Рисунок 4. То же, что и рис. 3, но с учетом «размазывания» изображения объекта по кадру за время экспозиции из-за его движения в картинной плоскости. Для синуса угла между скоростью объекта и направлением на наблюдателя выбрано предельное значение, равное отношению размера Земли к расстоянию до метеороида (при больших углах объект, очевидно, пролетает мимо). Таким образом, горизонтальная часть зависимости уже не соответствует траектории отдельного объекта, а ограничивает область возможных его траекторий. Звездная величина на этом участке соответствует потоку от объекта на пиксель – его поверхностной яркости – и соответствует проницанию инструмента, способного обнаружить объект на заданном расстоянии. Положение излома определяется временем экспозиции и для всех случаев (горизонтальные штриховые линии на рис. 3), кроме приведенного на рис. 4, находится существенно ниже предела обнаружения соответствующих инструментов.

всех полученных данных позволит сделать выводы о траектории объекта, состоянии его поверхности, массе, плотности, вращении, степени стабильности.

Основываясь на оценке параметров Челябинского метеорита, мы получили зависимость блеска объекта до входа в атмосферу от времени подлета *(рис. 3 и 4)*. В итоге оказалось, что сталкивающийся с Землей метеороид может быть обнаружен на расстоянии до 1 млн км при экспозиции 1000 с и до 100 тыс. км. при экспозиции 0,1 с; при этом время с момента обнаружения до входа в атмосферу лежит в диапазоне от получаса до недели в зависимости от того, направлена скорость объекта навстречу движению Земли или его движение является догоняющим.

Таким образом, система Mini-MegaTORTORA вполне способна обнаруживать опасные космические тела с размером, превышающим 10 м. Разумеется, поскольку время, проходящее до столкновения, составляет часы-дни, невозможно изменить траекторию движения объекта, однако возможно определить область падения и принять меры по защите людей. Ясно, что обнаружение будет тем более вероятным, а прогноз – более точным, чем большее количество систем будет проводить мониторинг. В этом случае будут минимизированы погодные и временные (восход Солнца) факторы, а также появится возможность определения расстояния до объекта с помощью триангуляции.

Многоканальный оптический телескоп SAINT (Small Aperture Imaging Network Telescope)

Естественным развитием концепции многоканальных мониторинговых систем высокого временного разрешения является проект многоэлементной сети, состоящей из оптических телескопов малого размера, способных быстро менять ориентацию и функционировать как независимо, так и синхронно. В определенной степени

такая система является аналогом радиотелескопов VLA, ALMA, SKA, не претендуя, однако, на использование в интерферометрическом режиме.

Мы полагаем, что этот инструмент может быть весьма эффективным и для обнаружения опасных космических тел любых размеров уже на больших расстояниях от Земли (в отличие от систем Mini-MegaTORTORA), конкурируя с Pan-STARRS и LSST. В то же время SAINT, обладая высоким временным разрешением и будучи способным работать как в мониторинговом, так и исследовательском (узкопольном) режимах, может и превзойти эти телескопы при обнаружении и изучении внезапно появляющихся быстродвижущихся объектов. С другой стороны, инструмент может проводить поиск и исследование любых других быстропротекающих явлений в ближнем и дальнем космическом пространстве при решении чисто астрофизических задач.

SAINT состоит из нескольких сотен (примерно 500) малых телескопов (диаметром 40 см) с полем зрения около 1 кв.градуса, его полное поле зрения около 500 кв.градусов, а временное разрешение – 0,1 с. Один из возможных вариантов параметров системы приведен в *табл. 3*. Каждый из каналов при этом устанавливается на отдельной экваториальной монтировке, имеющей максимально возможную скорость перенаведения (в идеале до 30–40 град/с).

В режиме мониторинга телескоп аккумулирует информацию обо всех стационарных и транзиентных (во времени и пространстве) источниках оптического излучения, локализованных на небесной полусфере (20 000 кв.град.), вплоть до 22 зв.величины за одну ночь наблюдений, – каждое поле размером около 500 кв.град. наблюдается в течение 15 минут единожды за ночь.

При обнаружении оптического транзиента все телескопы комплекса за доли секунды переориентируются на область его локализации для детального исследования (поляризационного, фотометрического, спектроскопического). В этом (исследовательском) режиме SAINT эквивалентен телескопу 8-метрового диаметра и может использоваться для решения широкого спектра стандартных астрофизических задач.

В процессе мониторинга выполняется основная цель – обнаружение новых и исследование уже известных нестационарных объектов различной природы и локализации. Впервые в мире может быть получена непрерывно обновляющаяся динамическая картина как ближнего, так и дальнего космического пространства с субсекундным временным разрешением.

Принципиальные отличия системы SAINT от других оптических инструментов:

- Предельно высокое временное разрешение (0,1 с), сочетающееся с большим полем зрения (500 кв.град.) и достаточно глубоким пределом (16–17 зв.вел. за 0,1 с).
- Универсальность метода наблюдений и первичной обработки накопленной информации позволит использовать одни и те же массивы данных для обнаружения и изучения объектов различных типов, решения разных астрофизических задач, всегда, тем не менее, связанных с быстропротекающими процессами.
- Обработка и анализ результатов мониторинга в режиме реального времени, а также в течение долей секунды при обнаружении и идентификации транзиентов. Это позволит информировать других астрономов о вновь вспыхнувшем источнике или опасном метеороиде, и немедленно перейти к его детальному изучению.
- Возможность перехода за доли секунды к режиму детального исследования объекта, в котором все малые телескопы ориентированы на одну область (1 кв. град.), что увеличивает чувствительность системы на 3 зв. величины и позволяет определять спектральные и поляриметрические характеристики транзиента. С этой целью каждый телескоп снабжен набором BVR фильтров и различно ориентированными поляроидами либо многомодовым фотоспектрополяриметром [15]

Таблица 3. *Параметры телескопа SAINT. Приведены диаметр канала D и эффективный диаметр всего телескопа Deff, светосила D/F, угловой размер пиксела на небе λ, число каналов в целом, предельные проницания в фильтре B на различных временных шкалах*

Diameter / effective diameter, cm	D/F	Pixel scale, arcsec	Number of channels	Channel Field of View / total Field of View, sq.degrees	Limits for 0.1, 10 и 1000 s for single channel / all channels
40 867	1/2	1.7	470	1.1 506.6	16.8 19.3 21.8 20.1 22.6 25.1

Таблица 4. Сравнение эффективности различных телескопов (A – эфф. площадь, Ω – площадь поля зрения)

Телескоп	Эфф. диаметр, м	Ω, кв. град^2.	AΩ
LINEAR	1.0	2.0	1.5
SDSS	2.5	3.9	6.0
CFHT	3.6	1	8.0
SUBARU	8.1	0.2	8.8
Pan-STARRS	3.6	7	60
LSST	6.5	9.6	190
SAINT	0.3–4.7	4.5–1125	79.5

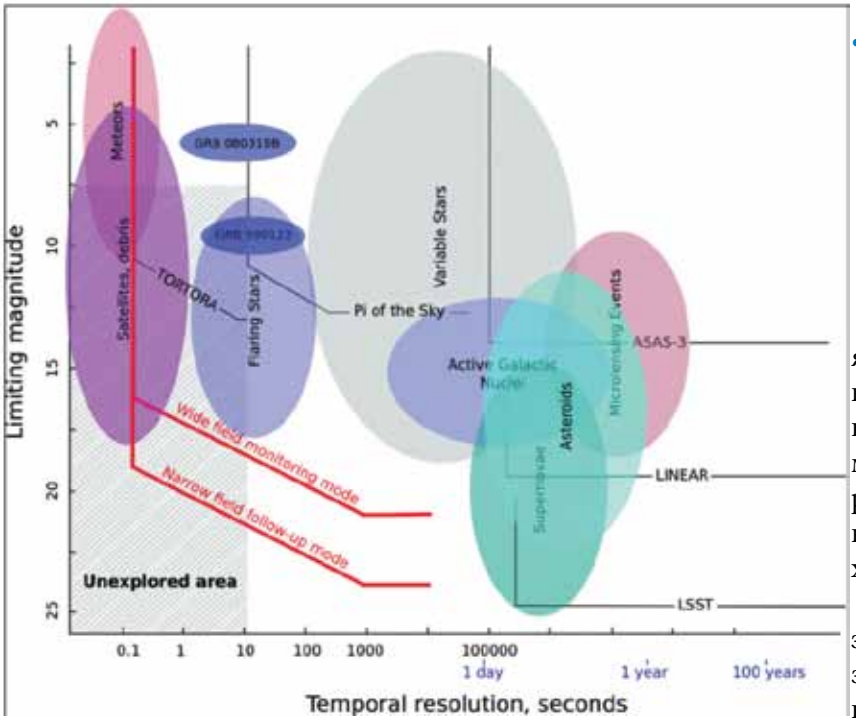


Рис. 5. Эффективность телескопа SAINT для наблюдений различных классов объектов в сравнении с таковой для других инструментов, как функционирующих в настоящее время (ASAS-3, LINEAR, Pi of the Sky, FAVOR/TORTORA), так и планирующихся на будущее (LSST)

Предлагаемый проект телескопа не имеет аналогов среди существующих оптических инструментов.

Комплекс алгоритмов и программ для текущей и апостериорной обработки данных должен позволять автоматически обнаруживать как неподвижные, так и движущиеся транзиенты, идентифицировать их (находить в каталогах известных источников либо относить к вновь обнаруженным), определять параметры и принимать решение о возможном переходе к исследовательскому режиму. Апостериорный анализ позволит суммировать последовательные кадры, доводя предел обнаружения в исследовательском режиме до 25 зв. величины за 1000 с, отождествлять объекты разных типов, определять параметры их переменности *(рис. 5)*.

Информационная система комплекса выполняет также следующие задачи:

- Поддержка баз данных для каждого типа уже известных объектов, текущее сравнение полученных характеристик с информацией из других каталогов и баз данных.
- Поддержка базы данных для вновь обнаруженных объектов, детальное изучение их свойств, сравнение с результатами наблюдений в других диапазонах, выводы об их природе.
- Поддержка специализированной базы данных для транзиентов, отнесенных к космическому мусору, анализ динамики этой быстроэволюционирующей совокупности объектов, построение ее статистической модели и разработка методов прогнозирования ее свойств.

В информационном плане SAINT является автономной роботизированной системой, способной выполнять широкий круг изначально сформулированных задач в оптимальном режиме, учитывая изменения условий внешней среды и полученные в ходе функционирования результаты.

Из *табл. 4* следует, что SAINT по эффективности превосходит все обзорные инструменты, будучи сравнимым с ними по цене. Исключением является запланированный для ввода в строй в конце 2021 г. широкопольный телескоп LSST, стоимость которого на порядок выше.

Основной результат реализации проекта – создание инструмента нового типа для обнаружения и исследования быстропеременных (во времени и пространстве) источников оптического излучения заранее неизвестной локализации. В конечном итоге будет построена общая выборка объектов, переменных на временах вплоть до до-

лей секунды. В дальнем космосе будут обнаружены и исследованы сотни тысяч нестационарных объектов известной природы и тысячи – неизвестной.

По существу, речь идет о создании универсальной системы контроля космического пространства, способной решать задачи по обеспечению глобальной космической безопасности.

Поддержка другими грантами INTAS (04–78–7366), CRDF (No. RP1–2394–MO-02), грантом Progetti Pluriennali 2003 Болонского университета, программой Президиума РАН, а также грантом Европейского Союза (283 783, проект GLORIA). Г. Б. Бескин также благодарит за поддержку фонд Cariplo и Landau Network-Cenro Volta. С. В. Карпов был поддержан грантом фонда «Династия» для молодых ученых.

Литература

1. ***Bondi H. Q. J. R.***
Astron. Soc., 11:443, 1970.
2. ***Бескин, Г. и др.***
УФН, 2010,180,4, 424
3. ***Zolotukhin I. et al.***
Astronomische Nachrichten, 325:675–675. –October 2004.
4. ***Karpov S. et al.***
Nuovo Cimento C, 28:747–750. –July 2005.
5. ***Molinari E. et al.***
Nuovo Cimento B, 121(12):1525–1526, 2006.
6. ***Zerbi F.M. et al.***
In E. Costa, F. Frontera, and J. Hjorth, editors, Gamma-ray Bursts in the Afterglow Era. –Page 434. – 2001.
7. ***Karpov S. et al.***
GRB Coordinates Network Circular, 7452:1 – 2008.
8. ***Racusin J. L. et al.***
Nature, 455:183–188. – Sep 2008.
9. ***Beskin G. et al.***
ApJ, 719:L10–L14. – August 2010.
10. ***Багров А.В. и др.,***
в сб.: «Околоземная астрономия – 2007», Тез. докл. междунар. конф., п. Терскол, Кабардино-Балкарская Республика, 3–7 сентября 2007 г. – Нальчик. – Изд-во КБНЦ РАН. – 2007. – С. 48.
11. ***Шустов, Б.М.,***
УФН. – 2011, 181, 10, 1104
12. ***Chambers, K. C.***
Bull. Am. Astron. Soc. 41, 270. – 2009
13. ***Ivezic Z, et al.***
Serb. Astron. J. 176, 1. – 2008
14. ***Бескин Г. и др.***
Бюллетень САО, 60–61:217–225. – 2007.
15. ***Плохотниченко В.Л. и др.***
Астрофизический бюллетень, 64:322–331. – July 2009.

English

Wide-field Monitoring with High Temporal Resolution as a Method for the Detection of Hazardous Space Objects*

Grigorii M. Beskin –
Doctor of Science, Head of Groupe Special astrophysical observatory of RAS, Nizhnij Arkhyz, Karachaevo-Cherkessija, 369167, Russia
e-mail: beskin@sao.ru

Sergey V. Karpov –
PHD, Senior researcher, Special astrophysical observatory of RAS, Nizhnij Arkhyz, Karachaevo-Cherkessija, 369167, Russia
e-mail: karpov@sao.ru

Vladimir L. Plokhotnichenko –
PHD, Senior scientist, Special astrophysical observatory of RAS, Nizhnij Arkhyz, Karachaevo-Cherkessija, 369167, Russia
e-mail: pvl@sao.ru

Sergey F. Bondar –
Branch of OAO "NPK SPP" SON Arkhyz", top scientific area of SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, Karachaevo-Cherkessija, 369167, Russia
e-mail: bonds@sao.ru

Evgeniy A. Ivanov –
Sector head, Branch of OAO "NPK SPP" SON Arkhyz", top scientific area of SAO RAS
e-mail: ivanov@sao.ru

Elena V. Katkova –
Group head, Branch of OAO "NPK SPP" SON Arkhyz", top scientific area of SAO RAS,Nizhnij Arkhyz, Karachaevo-Cherkessija, 369167, Russia
e-mail: elka@sao.ru

Aleksey V. Perkov –
Chief engineer, Branch of OAO "NPK SPP" SON Arkhyz", top scientific area of SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, Karachaevo-Cherkessija, 369167, Russia
e-mail: pir@sao.ru

Viacheslav V. Sasyuk –
PHD, Head of Department, Federal University, Kazan (Volga Region), 18 Kremlyovskaya Str., Kazan, 420008, Russia
e-mail: Slavik2001@mail.ru

Andrew Shearer –
PHD, Director of Centre for Astronomy, School of Physics Room 143, National University of Ireland, Galway Galway, Ireland
andy.shearer@nuigalway.ie

Abstract

We propose to use multi-channel optical systems equipped with sub-second temporal resolution detectors to detect and study hazardous space objects, both natural and artificial. We constructed two Mini-MegaTORTORA instruments (with 6 and 9 channels), which may operate in two regimes - wide-field monitoring (with 600 and 900 square degrees FOVs) and narrow-field follow-up (100 square degrees field of view). In the latter regime, all channels are pointed towards the same object (rapidly moving) detected in monitoring. Fast, sub-second repointing of channels is provided by the rotation of celostate mirrors placed before the objectives, while the measurement of color and polarization of transients – by the set of filters and polarizers. We discuss the details of these systems design, their characteristics and the parameters of objects detectable. As a next step of evolution of such systems we propose the project of a complex of several hundreds of 40-cm telescopes with 1 square degree field of view each.

Keywords: optical monitoring, photometry, hazardous cosmic objects.

References

1. ***Bondi H. Q. J. R.***
Astron. Soc., 11:443, 1970.
2. ***Beskin, G. i dr.***
UFN, 2010,180,4, 424
3. ***Zolotukhin I. et al.***
Astronomische Nachrichten, 325:675–675. –October 2004.
4. ***Karpov S. et al.***
Nuovo Cimento C, 28:747–750. –July 2005.
5. ***Molinari E. et al.***
Nuovo Cimento B, 121(12):1525–1526, 2006.
6. ***Zerbi F.M. et al.***
In E. Costa, F. Frontera, and J. Hjorth, editors, Gamma-ray Bursts in the Afterglow Era. –Page 434. – 2001.
7. ***Karpov S. et al.***
GRB Coordinates Network Circular, 7452:1 – 2008.
8. ***Racusin J. L. et al.***
Nature, 455:183–188. – Sep 2008.
9. ***Beskin G. et al.***
ApJ, 719:L10–L14. – August 2010.
10. ***Bagrov A.V. i dr.,***
v sb.: «Okolozemnaja astronomija – 2007», Tez. dokl. mezhdunar. konf., p. Terskol, Kabardino-Balkarskaja Respublika, 3–7 sentjabrja 2007 g. – Nal'chik. – Izd-vo KBNC RAN. – 2007. – S. 48.
11. ***Shustov, B.M.,***
UFN. – 2011, 181, 10, 1104
12. ***Chambers, K. C.***
Bull. Am. Astron. Soc. 41, 270. – 2009
13. ***Ivezic Z, et al.***
Serb. Astron. J. 176, 1. – 2008
14. ***Beskin G. i dr.***
Bjulleten' SAO, 60–61:217–225. – 2007
15. ***Plohotnichenko V.L. i dr.***
Astrofizicheskij bjulleten', 64:322–331. – July 2009.

* *The work was financially supported by RFBR (project № 04–02–17 555, 06–02–08313, 09–02–12053 и 12–02–00743)*

Получение физических характеристик избранных астероидов, сближающихся с землей*

Рыхлова Л.В., Баканас Е.С., Барабанов С.И., Бусарев В.В.

На 1-м телескопе НИИ КрАО была выполнена высокоточная фотометрия избранных астероидов, сближающихся с орбитой Земли. На 2-м телескопе на п. Терскол в КБР проведена спектрометрия низкого разрешения для двух астероидов, сближающихся с орбитой Земли, и пяти астероидов Главного пояса. По разработанной в ИНАСАН методике обработки и анализа наблюдений были получены следующие характеристики наблюдаемых астероидов: абсолютные звездные величины в фильтрах BVRI, разности цвета B-V, V-R, R-I, геометрическое альбедо в диапазоне длин волн используемых фильтров, размеры астероидов, периоды их вращения вокруг собственной оси, спектральные классы и оценка масс. В статье приводятся полученные результаты для астероидов: 330825 (2008 XE3), 141018 (2001 WC47) and 312473 (2008 SX245). По полученным спектрам низкого разрешения определялись спектральные классы исследованных астероидов, отличия от модельных спектров заданных спектральных классов для выявления особенностей минералогического состава вещества поверхности астероидов, а также для поиска аналогов среди астероидов, сближающихся с орбитой Земли, и найденных на Земле образцов метеоритов. Приведены результаты исследований для следующих астероидов: Pomona (32), 145 Adeona, 704 Interamnia, 779 Nina, 330825 (2008 XE3) and 2012 QG42. После Челябинского события 14 февраля 2013 г. был проведен поиск связей определенной по видеонаблюдениям орбиты болида с другими орбитами малых тел Солнечной системы и обнаружен метеорный рой, связанный с орбитой Челябинского болида.

Ключевые слова: астероидно-кометная опасность, потенциально-опасные тела, обнаружение и мониторинг опасных небесных тел, последствия падений небесных тел на Землю, методы защиты, орбиты малых тел Солнечной системы, астероиды, кометы, прогнозы столкновения с Землей, Институт астрономии РАН.

* *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-02-90444)*

В мире активно ведутся наблюдения малых тел Солнечной системы. Большое количество наблюдений астероидов позволяет определить достаточно точно их орбиты, но физические характеристики большинства из них все еще остаются неизвестными. Из более чем, 600 тыс всех известных астероидов только около 2 тыс. отнесены к какому-либо таксономическому классу, т.е., только для 0,03% от общего числа астероидов определены физические свойства, хотя над этой проблемой работают обсерватории во всем мире. Для астероидов, сближающихся с орбитой Земли (АСЗ), доля астероидов, отнесенных к тому или иному таксономическому классу, составляет менее 0,5% от общего количества АСЗ.

Самые важные объекты с точки зрения проблемы астероидно-кометной опасности – это объекты, сближающиеся с Землей. Именно для этого класса и необходимо в первую очередь знать их параметры: состав, альбедо, размеры, период вращения. Эта информация необходима, в том числе, при выборе средств противодействия, так как астероиды, сближающиеся с Землей, имеют ненулевой шанс столкнуться с Землей. При этом особую важность приобретают статистические исследования о принадлежности астероидов различных групп объектов, формируемых по схожести орбит, к определенным таксономическим типам, связь внутри подобных групп и понимание, какова вероятность того, что именно этот угрожающий Земле объект, принадлежащий по типу орбиты

РЫХЛОВА Лидия Васильевна
ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, руководитель научно-исследовательской группы ИНАСАН.

БАКАНАС Елена Сергеевна
кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ИНАСАН.

БАРАБАНОВ Сергей Иванович
кандидат физико-математических наук, заведующий Звенигородской обсерваторией, руководитель отдела ИНАСАН.

БУСАРЕВ Владимир Васильевич
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ГАИШ МГУ, ИНАСАН.

Табл. 1. Результаты фотометрических исследований

Астероид	Результаты
141018 (2001 WC47)	P=16,747±0,006h, близок к B и F (подклассы класса C –гидратированные силикаты, углистые хондриты), D=1,1±0,1км [6]
312473 (2008 SX245)	P=16,747±0,006h, близко к S (пироксен, оливин, металл) и Q (обыкновенные хондриты), D=1,2±0.1км [6]
330825 (2008 XE3)	P=4,45±0,05 h, близко к C-типу, определенный тип по фотометрии совпал с определенным позднее по спектрам

Табл. 2. Результаты спектральных наблюдений

Астероид	Результаты
Pomona (32) S-тип, высокотемпературная минералогия)	Обнаружены изменения деталей (полос поглощения) спектров отражения с вращением астероида, что позволяет предполагать наличие на ее поверхности, по крайней мере, двух типов вещества – более и менее окисленных (в зависимости от содержания Fe3+).
145 Адеона , 704 Интерамнии и 779 Нины (Ch-тип, низкотемпературная минералогия)	Обнаружены сходные спектральные вариации с вращением. В соответствии с характерными особенностями спектров отражения этих астероидов при разных фазах вращения на них можно выделить 3-4 типа поверхностного вещества. Впервые установлено, что эти типы практически совпадают, что может быть указанием на общность их происхождения.
330825 (2008 XE3) (C-тип, низкотемпературная минералогия)	Обнаружено небольшое изменение общей формы спектра отражения с вращением и отсутствие каких-либо полос поглощения. Такие особенности свидетельствуют о наличии непрозрачного компонента (возможно, углерода) в поверхностном веществе астероида.
2012 QG42 (Cg-тип, низкотемпературная минералогия)	Обладает более неоднородной поверхностью, на которой можно выделить два спектральных типа вещества, различающихся содержанием гидратированных силикатов.

к определенной группе, будет иметь тот или иной химический состав.

Особое значение в настоящее время имеют исследования физических особенностей астероидов и комет, которые проявляют двойственную природу: и как астероиды, и как кометы (например, появление комы при сближении с Солнцем). В основном такие объекты имеют кометные орбиты.

В ИНАСАН с 2010 г. проводятся наблюдения избранных астероидов и комет, сближающихся с Землей, для оценки их физических характеристик, и создается приборно-методическая основа для регулярного и массового получения наблюдательного материала. В ходе фотометрических наблюдений объектов отрабатываются методики получения таких характеристик астероидов, как периоды собственного вращения (P) и соотношение осей модельного эллипса для определения формы астероида, оценка таксономического класса, альбедо, диаметра (D), возможности существования у астероидов спутников. С 2012 г. начаты спектрометрические наблюдения АСЗ.

В 2012–2013 г. в ходе плановых фотометрических наблюдений избранных астероидов, сближающихся с Землей, и комет, имеющих интересные орбиты, было исследовано 14 астероидов и одна комета. Наблюдения проводились на 1-м телескопе в НИИ КрАО на г. Кошка (Симеиз, Украина).

Необходимая для перехода к международной системе Джонсона-Крона-Коузенса калибровка используемой аппаратуры периодически проводится по наблюдениям старого рассеянного скопления M67, а также избранных площадок Ландольта [1].

В рамках данного проекта для комплексного исследования наблюдаемых астероидов, сближающихся с орбитой Земли, и связи их с другими малыми телами Солнечной системы, вычисляются минимальные расстояния между орбитой Земли и астероида, моменты прохождения Земли через точку минимального сближения и теоретические радианты гипотетических метеорных потоков в этих точках для поиска астероидно-кометно-метеороидных комплексов, в которые эти астероиды могли бы входить. Одновременно с этим проводились поисковые наблюдения тел с размерами свыше 1 м в метеорных потоках, ассоциированных с астероидами и кометами. После падения Челябинского метеорита был проведен поиск связанных с его орбитой метеоров. Были обнаружены радиометеоры, находящиеся на орбитах, близких к орбите Челябинского болида [2].

В обсерватории на п. Терскол в сентябре 2012 г. на 2-м телескопе с призменным ПЗС-спектрометром (WI CCD 1240x1150) в диапазоне 3500-9000Å с разрешающей способностью R=100 на длине волны 5500 Å была выполнена экспериментальная спектрофотометрия нескольких астероидов Главного пояса и астероидов, сближающихся с орбитой Земли. В качестве стандарта и солнечного аналога использовалась звезда HD10307 (G1.5V) [3]. Обработка ПЗС-данных проводится с использованием стандартных процедур и пакета Dech [4]. Калибровка длин волн выполнена по Бальмеровским линиям водорода в спектре звезды α Peg (B9III). Регистрация нескольких спектров каждого астероида осуществлялась в течение ~1–2h. Расчет спектров отражения выполнен по общепринятой методике [5]. Это позволило сделать уточнение или оценку их спектральных типов и минералогии.

Литература

1. ***Landolt A. U.***
UBVRI photometric standard stars in the magnitude range 11.5–16.0 around the celestial equator // Astronomical Journal, 1992. – Vol. 104, no. 1. – P. 340–371.
2. ***Terentjeva A., Bakanas E.***
Meteor stream of the large Chelyabinsk fireball // J. Int. Meteor Organization (WGN). – 2013. – V. 41, № 2. – P. 39.
3. ***Hardorp J.***
The sun among the stars. III – Energy distributions of 16 northern G-type stars and the solar flux calibration // Astron. Astroph., 1980. 91. – P. 221.
4. ***Галазутдинов Г.А.***
// Публикации САО РАН. – 1992. – 92, 1.
5. ***Бусарев В.В.***
Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // Астрон. вестн. – 1999. 33. – С. 140.
6. ***Баканас Е.С., Барабанов С.И., Крючков С.В., Николенко И.В.***
Результаты фотометрических наблюдений астероидов 141018(2001 WC47) и 312473 (2008 SX245) // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. – 2013. – № 220. – Труды Всероссийской астрометрической конференции «Пулково-2012». – СПб. – 19–22 сс.

English

Physical Properties of Selected NEA's*

Lidia V. Rykhlova –
Full doctor of sciences, Head of Department, of the Russian Academy of Sciences (INASAN)
48 Pyatnitskaya St. Moscow, 119017, Russia
e-mail: Rykhlova@inasan.ru

Elena S. Bakanas –
PHD, researcher Head, of Astronomy of the Russian Academy of Sciences (INASAN)
48 Pyatnitskaya St. Moscow, 119017, Russia
e-mail: alena@inasan.ru

Sergey I. Barabanov –
PHD, Head of Zvenigorod Observatory Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences (INASAN)
48 Pyatnitskaya St. Moscow, 119017, Russia
e-mail: sbarabanov@inasan.ru

Vladimir V. Busarev –
full doctor of sciences, Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences (INASAN), Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University (SAI MSU), Universitetsky pr., 13, Moscow 119991, Russia
busarev@sai.msu.ru

Abstract

Results of photometrical measurements are analyzed for complex study of asteroid physical properties and for designation their spectral or taxonomical types, supposed origin of their formation. By developed in INASAN method of processing and analyze of photometrical data the following properties for observed asteroids were arrived: asteroid size, rotation period(s), spectral type estimate. The article includes the characteristics of asteroids: 330825 (2008 XE3), 141018 (2001 WC47) and 312473 (2008 SX245). Using spectrometric observations were identified features of selected asteroids (Pomona (32), 145 Adeona, 704 Interamnia, 779 Nina, 330825 (2008 XE3) and 2012 QG42). Meteor stream associated to the large Chelyabinsk fireball have been found.

Keywords: comet-asteroid hazard, potentially hazardous objects, detection and monitoring of dangerous celestial bodies, the impact of celestial bodies falling to Earth, methods of protection, orbit of small bodies of the Solar system, asteroids, comets, forecasts of collision with the Earth, Institute of Astronomy of RAS.

References

1. ***Landolt A. U.***
UBVRI photometric standard stars in the magnitude range 11.5–16.0 around the celestial equator // Astronomical Journal. – 1992. –Vol. 104, no. 1, P. 340–371.
2. ***Terentjeva A., Bakanas E.***
Meteor stream of the large Chelyabinsk fireball // J. Int. Meteor Organization (WGN). – 2013. – V. 41, № 2. – P. 39.
3. ***Hardorp J.***
The sun among the stars. III – Energy distributions of 16 northern G-type stars and the solar flux calibration // Astron. – Astroph., – 1980. 91, – P. 221.
4. ***Galazutdinov G.A.***
//Publcations of SAO RAS, 1992.92, 1 (in Russan)
5. ***Busarev V.V.***
Spectrophotometry of Atmosphereless Celestial Bodies of the Solar System // Solar System Research. – Vol. 33. – P. 120 (1999).
6. ***Bakanas E.S., Barabanov S.I., Kryuchkov S.V., Nikolenko I.V.***
The results of photometric observatons of the asteroids 141018 (2001 WC47) and 312473 (2008 SX245) //Izvestya GAO RAN. – 2013. – № 220. – Proceedings of all-Russian asrtrometric conference "Pulkovo–2012". – St-P. – 19–22 pp (in Russian).

* *The work was financially supported by RFBR (project № 12-02-90444)*

О грязевых вулканах и не только

Стажировка молодого российского ученого В.В. Ершова в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Начать свой рассказ хочется издалека. В 2004 г. после окончания физико-математического факультета Сахалинского государственного университета я устроился на работу в Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН (ИМГиГ ДВО РАН). Меня прикрепили к научному направлению, которое вел один из старейших и заслуженных сотрудников Института – кандидат геолого-минералогических наук Олег Александрович Мельников. К глубокому сожалению, в августе 2010 г. после тяжелой болезни он ушел из жизни.

Значительную часть своей научной жизни Олег Александрович посвятил изучению грязевых вулканов острова Сахалин. При первой же нашей встрече он с энтузиазмом принялся вводить меня в курс дела и спросил, слышал ли я что-нибудь о грязевых вулканах. Поскольку вопрос в большей степени был риторическим, то в ответ я смог позволить себе неопределенно пожать плечами. Однако, честно говоря, о грязевых вулканах я на тот момент совсем ничего не знал. Нет, я, конечно, много слышал до этого о вулканах, но совсем других – магматических. И вот от Олега Александровича я тогда узнал о еще одном типе вулканов, которые при извержении выбрасывают не раскаленную магму, а сравнительно холодную, насыщенную водой и газом, разнообломочную грязевую массу – сопочную брекчию.

Группа активных грифонов Южно-Сахалинского грязевого вулкана

Позже я понял, к какой интересной и разносторонней научной проблематике меня приобщил Олег Александрович. Грязевой вулканизм является объектом исследования практически всех естественно-научных дисциплин: геологии, геофизики, геохимии, сейсмологии, прикладной математики и др. И я возьму на себя ответственность заявить, что ни одна из этих дисциплин не сможет в одиночку разгадать загадки грязевых вулканов. Грязевой вулкан – это, несомненно, междисциплинарный объект исследования, требующий соответствующего комплексного рассмотрения. При изучении грязевого вулканизма рассматривается ряд важных проблем, имеющих прикладное и фундаментальное значение. К ним относятся, прежде всего, связь грязевого вулканизма с нефтегазоносностью, вклад грязевулканических газов в общий баланс парниковых газов в атмосфере, а также связь деятельности грязевых вулканов с региональной сейсмичностью. Катастрофические извержения грязевых вулканов могут оказывать существенное воздействие на окружающую среду. Так, например, в 2006 г. в Индонезии произошло известное извержение вулкана LUSI, которое нанесло региону огромный экономический ущерб. Подводные грязевые вулканы часто располага-

ЕРШОВ
Валерий Валерьевич
научный сотрудник Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН.

ются на континентальных шельфах, поэтому даже относительно слабые извержения могут вызывать разрушения прибрежной инфраструктуры (кабельных каналов связи, нефтегазопроводов и др.) и затруднять навигацию в прибрежных водах. В связи с этим очень важно иметь корректные оценки пространственно-временных масштабов извержений грязевых вулканов.

Но вернемся к лету 2004 г. Тогда передо мной сразу был поставлен ряд научных и организационных задач. Времени на раскачку, естественно, мне никто не давал – во все приходилось вникать уже по ходу дела. Меня сразу же подключили к работе по оформлению заявки на инициативный проект РФФИ, а уже на следующий год я был назначен начальником экспедиции, организованной в рамках выигранного нами гранта РФФИ № 05-05-64124 «Грязевые вулканы Сахалина: связь динамики вещественного состава, термического режима и геофизических полей с современными движениями земной коры». В общем, принцип обучения был очень простой и действенный: человека бросали в воду и смотрели, поплывет он или нет. Теперь можно констатировать, что я все-таки поплыл.

С тех пор прошло более шести лет, которые вместили в себя уникальные мониторинговые наблюдения, проведенные на Южно-Сахалинском грязевом вулкане, десяток статей в рецензируемых журналах, выступления на разного уровня конференциях, встречи с разными интересными людьми. С одним из таких людей знакомство переросло в плодотворное, и надеюсь длительное, сотрудничество. Это заведующий лабораторией прикладной геофизики и вулканологии Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), доктор физико-математических наук Алексей Леонидович Собисевич. Одним из направлений его научных исследований является изучение грязевых вулканов Таманского полуострова. Наша первая беседа

Научный руководитель стажировки А.Л. Собисевич

больше носила общий ознакомительный характер. С моей стороны особо рассказать было нечего – я тогда только начинал свою научную деятельность. Тесный рабочий контакт установился около двух лет назад. К тому времени у нас всех появились весомые результаты, что, как известно, является лучшим стимулом для продолжения работы.

В результате проведенных комплексных исследований грязевых вулканов острова Сахалин в моем распоряжении оказалось большое количество эмпирического материала о различных параметрах деятельности вулканов. Этот материал требовал теоретического обобщения и большую помощь в этом вопрос мне оказал сотрудник нашего Института, доктор физико-математических наук Андрей Владимирович Доманский, который является специалистом высокого уровня по подземной гидромеханике. Итогом нашей работы стала математическая модель подготовки извержений грязевых вулканов [1]. Для математического описания течений геофлюидов в подводящем канале грязевого вулкана, который считался трещиновато-пористой средой, были использованы нестационарные уравнения одно- и двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей (газа и водогрязевой смеси). Согласно этой модели, нижняя часть подводящего канала заполнена газом, а верхняя часть канала – водогрязевой смесью. Между газом и столбом водогрязевой смеси со временем устанавливается неустойчивое равновесие, которое нарушается с ростом давления газа, вытесняющего водогрязевую смесь. Вытеснение газом смеси рассматривается до момента извержения вулкана, при котором происходит сброс давления газа. После этого происходит подготовка нового извержения вулкана.

Алексей Леонидович вместе со своими коллегами из ИФЗ РАН занимаются исследованием глубинного строения грязевых вулканов. Исследования проводятся с помощью новой технологии низкочастотного микросейсмического зондирования (разработка ИФЗ РАН, патент РФ № 2271554) [2]. В основе метода лежит предположение, что вертикальная компонента микросейсмического поля в низкочастотном диапазоне определяется преимущественным вкладом фундаментальных мод поверхностных волн Рэлея. Глубинный разрез, полученный с помощью метода микросейсмического зондирования, показывает расположение и форму неоднородностей среды по признаку контрастов сейсмических скоростей. Области с пониженными сейсмическими скоростями соответствуют более трещиноватым и флюидонасыщенным структурам.

В процессе обсуждения с Алексеем Леонидовичем актуальных проблем грязевого вулканизма возникла идея провести комплексные исследования глубинного строения ряда грязевых вулканов теоретическими и экспериментальными методами. Реализация этой идеи и стала целью моей научной стажировки в ИФЗ РАН.

Математическая модель подготовки извержений грязевого вулкана позволяет поставить и однозначно решить обратную задачу, то есть определить глубины залегания корней вулкана и источника газа. Решение обратной задачи получается из предположения, что длительности процессов двухфазной фильтрации и фильтрации газа в подводящем канале пропорциональны характерным временам этих процессов, а также из условия равенства давлений газа и столба водогрязевой смеси на момент их равновесия.

С помощью метода низкочастотного микросейсмического зондирования были определены размеры и конфигурация флюидоподводящих каналов грязевых вулканов Шуго и гора Карабетова (Таманский полуостров). Пути миграции флюидов для этих вулканов были прослежены до глубин 15–25 км. Эти данные были использованы, с одной стороны, для уточнения некоторых входных параметров модели (например, угол падения подводящего канала), а с другой – для верификации самой модели путем сравнения эмпирических и расчетных данных.

При модельных вычислениях использовался также ряд параметров, для которых перед началом расчетов необходимо было сделать корректные оценки их значений. К таким параметрам относятся химический состав, вязкость и коэффициент сжимаемости газа, период времени между извержениями и проницаемость подводящего канала.

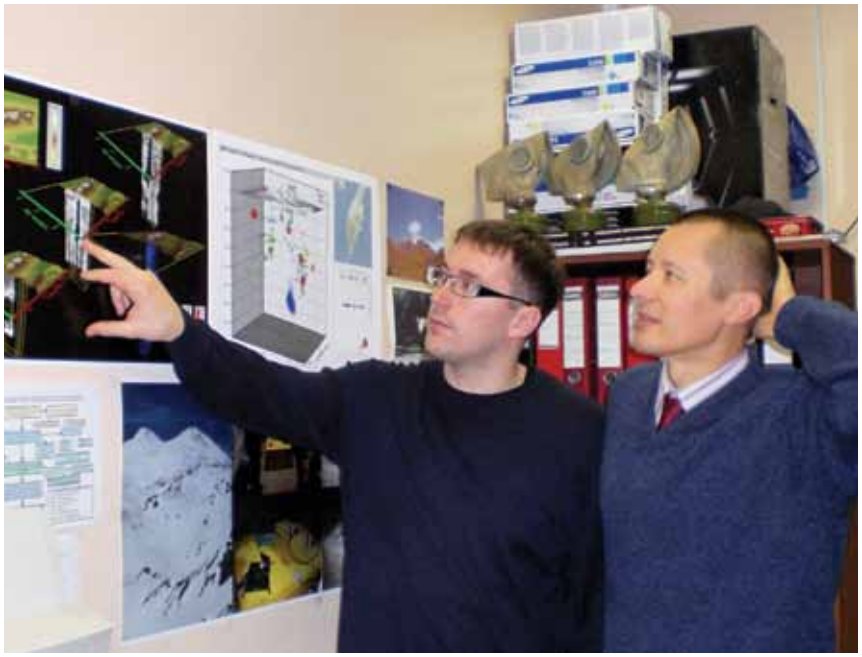
Автор этих строк проводит расчеты в лаборатории прикладной геофизики и вулканологии ИФЗ РАН

Средний химический состав газа в каждом из рассматриваемых вулканов определялся на основе анализа литературных данных. Из полученных выборок химического состава проб газа, отобранных на вулканах разными исследователями, исключались данные по тем пробам, которые предположительно были загрязнены атмосферным воздухом. Отбраковка производилась на основе известных корреляционных зависимостей между различными газовыми компонентами.

Для определения средней вязкости и коэффициента сжимаемости газа приближенно считалось, что температура и давление газа в какой-либо точке подводящего канала вулкана равны температуре и давлению вмещающих пород на данной глубине. Подводящий канал разбивался на множество небольших участков, для каждого из которого отдельно вычислялись вязкость и коэффициент сжимаемости газа, после чего выполнялось осреднение этих параметров по всей длине канала.

Для оценки среднего периода извержений вулкана считалось, что распределение извержений грязевых вулканов во времени описывается законом Пуассона. Учитывалось также, что полнота составленного по литературным данным каталога извержений для рассматриваемых вулканов составляет не более 75%. Последнее следует из результатов работы наших зарубежных коллег по статистическому анализу каталогов извержений грязевых вулканов Азербайджана, который является классическим регионом развития грязевого вулканизма [3].

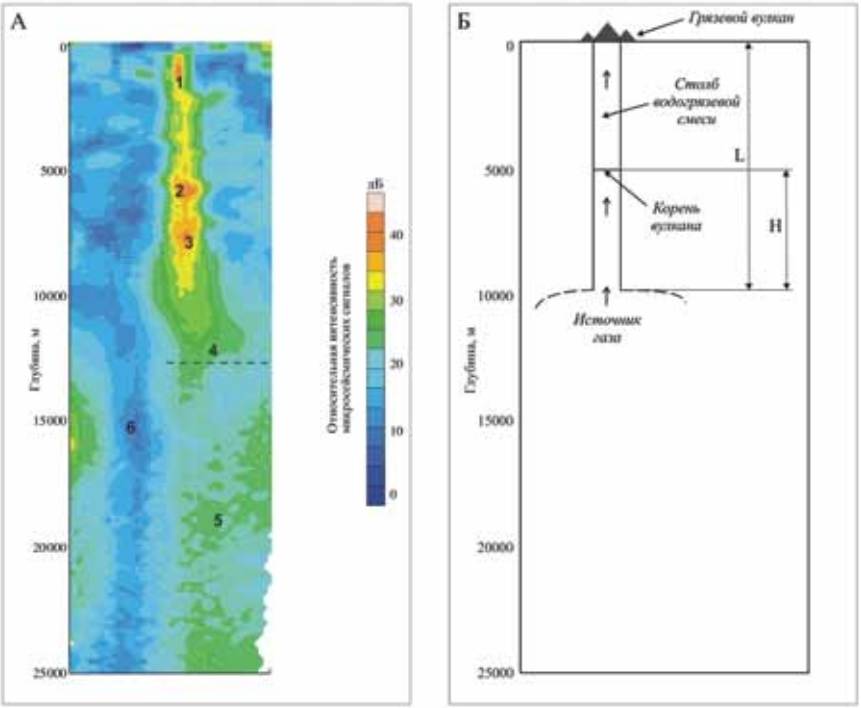
Наиболее загадочным и трудно определяемым параметром являлась проницаемость подводящего канала. Поскольку грязевые вулканы приурочены к разломным зонам земной коры, то при расчетах нами брались значения проницаемости, которые характерны для сильно трещиноватых тектонически раздробленных пород. Однако более-менее точные



Обсуждение результатов микросейсмического зондирования грязевого вулкана гора Карабетова

значения проницаемости подводящего канала все равно остаются для нас неизвестными. В этом отношении данные, полученные при микросейсмическом зондировании грязевых вулканов, представляют особую ценность. При сопоставлении геофизических разрезов для вулканов Шуго и гора Карабетова было отмечено, что относительная интенсивность микросейсмических сигналов для подводящего канала вулкана гора Карабетова в 1,5–2 раза выше, чем для вулкана Шуго. Известно, что в методе микросейсмического зондирования относительная интенсивность реакции среды зависит от эффективного модуля сдвига среды, который зависит от трещиноватости среды, а последняя напрямую связана с проницаемостью среды. Отсюда следует, что проницаемость канала вулкана гора Карабетова больше, чем проницаемость канала вулкана Шуго, что и учитывалось при наших расчетах.

В период стажировки выполнялось исследование глубинного строения некоторых из грязевых вулканов Таманского полуострова и острова Сахалин: Шуго, гора Карабетова и Южно-Сахалинского. В качестве примера выполненных расчетов хочется привести результаты, полученные для вулкана гора Карабетова. При этих расчетах газообразный флюид в канале вулкане считался бинарной газовой смесью, состоящей из метана и углекислого газа, содержание которых равно 82% и 18% соответственно. Геотермический градиент во вмещающих пород составлял 29,5 0С/км. Считалось, что проницаемость подводящего канала составляет около 0,2 дарси. Период времени между двумя последовательными извержениями принимался равным шести годам. При дан-



Сопоставление эмпирических (А) и модельных (Б) данных по строению грязевого вулкана гора Карабетова (увеличение интенсивности сигналов соответствует повышенной трещиноватости и флюидонасыщенности)

ных значениях входных параметров получено, что глубина залегания L для газовой залежи, питающей вулкан, составляет около 9700 м. Глубина залегания L–H корня вулкана (высота столба водогрязевой смеси) составляет около 5000 м.

Для дополнительных оценок глубина генерации грязевулканических геофлюидов использованы различные известные изотопные и гидрохимические геотермометры: зависимость от температуры изотопного состава углерода метана, температурную зависимость фракционирования изотопов углерода в системе метан–углекислый газ, зависимость от температуры химического состава вод грязевых вулканов. Пересчет температуры в глубину производился на основе известных региональных геотермических градиентов.

По итогам выполненной работы можно сделать следующий общий вывод. Оценки глубины залегания грязевулканических резервуаров и корней грязевых вулканов, полученные по различным данным, показывают хорошее соответствие между собой для каждого из рассматриваемых вулканов. Соответственно математическая модель описания движения геофлюидов в грязевулканических структурах является адекватной и может быть использована для дальнейших расчетов по данной проблематике.

К сожалению, у нас отсутствуют какие-либо геофизические данные по глубинному строению Южно-Сахалинского грязевого вулкана, поэтому вопрос о надежности результатов выполненных расчетов пока остается открытым. В своих творческих планах на 2010 г. я предполагал провести микросейсмическое зондирование на Южно-Сахалинском вулкане, но из-за финансовых трудностей такие работы выполнить не удалось. С этой точки зрения для себя лично я не могу признать стажировку удавшейся на все 100%. Однако я надеюсь, что задуманная работа все-таки будет выполнена в ближайшем будущем, поскольку, как мне кажется, все российские ученые по своей натуре должны быть и являются большими оптимистами.

В заключение считаю приятным долгом выразить благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку молодых ученых. Гранты Фонда дают им возможность постоянно повышать свои профессиональные квалификацию и опыт, а также реализовывать на практике свои научные идеи и замыслы.

Литература

1. ***Доманский А.В., Ершов В.В., Левин Б.В.***
Математическая модель неустановившихся течений геофлюидов при грязевулканических процессах // Доклады Академии наук, 424 (2009), № 1. – С. 107–110.
2. ***Горбатиков А.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Степанова М.Ю., Овсюченко А.Н.***
Технология глубинного зондирования земной коры с использованием естественного низкочастотного микросейсмического поля / Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. – Т. 1. Сейсмические процессы и катастрофы. М.: ИФЗ РАН. – 2008. – С. 223–236.
3. ***Mellors R., Kilb D., Aliyev A., Gasanov A., Yetirmishli G.***
Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions // Journal of Geophysical Research, 112 (2007). doi: 10.1029/2006JB004489.

English

About the Mud Volcanoes and Not Only

Valery V. Ershov –
researcher, Institute of marine Geology and Geophysics,
far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences Feb RAS,
Science St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia
e-mail: ershov@imgg.ru

References

1. ***Domanskii A.V., Ershov V.V., Levin B.V.***
A Mathematical Model of Unsteady Flows of Geofluids in Mud Volcanic Processes // Doklady Earth Sciences, Vol. 424 (2009), № 1. – p. 95-98.
2. ***Gorbatikov A.V., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Stepanova M.Yu., Ovsjuchenko A.N.***
Tehnologija glubinnogo zondirovanija zemnoj kory s ispol'zovaniem estestvennogo nizkochastotnogo mikrosejsmicheskogo polja / Izmenenie okruzhajushhej sredy i klimata: prirodnye i svjazannye s nimi tehnogennye katastrofy. – T. 1. Sejsmicheskie processy i katastrofy. M.: IFZ RAN. – 2008. – p. 223–236.
3. ***Mellors R., Kilb D., Aliyev A., Gasanov A., Yetirmishli G.***
Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions // Journal of Geophysical Research, 112 (2007). doi: 10.1029/2006JB004489.

Подписано в печать 20.11.2013. Формат 60 x 90 $^{1}/_{8}$.
Печ. л. 6,5. Тираж 1100 экз.

Оригинал-макет ЗАО «ИТЦ МОЛНЕТ»
123104, г. Москва, Малый Палашевский пер., д. 6
Тел./факс: (495) 927 0198,
e-mail: info@molnet.ru
Печать ООО «ТрансАвтоматизация»
121433, г. Москва, ул. Б. Филевская, д. 41, кор.1