



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. Балёга

Редакционная коллегия:

В.А. Геловани, Ю.Н. Кульчин, В.П. Матвеев, 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



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

«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 |
| <i>Балега Ю.Ю.</i> | |
| Аннотация к тематическому блоку..... | 10 |
| <i>Маров М.Я., Шустов Б.М.</i> | |
| Метеорит «Челябинск»: основные характеристики падения..... | 11 |
| <i>Ахметшин Р.З., Ефимов Г.Б., Энеев Т.М.</i> | |
| Оптический барьер в схеме космического патруля..... | 15 |
| <i>Мушаилов Б.Р.</i> | |
| Космическая угроза. Стратегия выживания..... | 18 |
| <i>Шувалов В.В., Артемьева Н.А.</i> | |
| Физические явления при падении небольших космических тел на Землю и их моделирование..... | 26 |
| <i>Бескин Г.М., Карпов С.В., Плехотниченко В.Л., Бондарь С.Ф., Перков А.В., Иванов Е.А., Каткова Е.В., Сасюк В., Шерер Э.</i> | |
| Широкоугольный оптический мониторинг высокого временного разрешения как способ обнаружения опасных космических объектов..... | 34 |
| <i>Рыхлова Л.В., Баканас Е.С., Барабанов С.И., Бусарев В.В.</i> | |
| Получение физических характеристик избранных астероидов, сближающихся с землей..... | 43 |

ВЫБОР МОЛОДЫХ

| | |
|--------------------------------------|----|
| <i>Ершов В.В.</i> | |
| 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 |
| <i>Yu. Balega</i> Abstract of the Thematic Section..... | 10 |
| <i>Marov M., Shustov B.</i> Meteorite "Chelyabinsk": Main Characteristics of the Fall..... | 11 |
| <i>Akhmetshin R., Efimov G., Eneev T.</i> The Optical Barrier in Space Patrol Scheme..... | 15 |
| <i>Mushailov B.</i> Cosmic Threat. The Strategy of Survival..... | 18 |
| <i>Shuvalov V., Artemieva N.</i> Physical Phenomena Caused by the Fall of Small Space Bodies onto the Earth and their Modelling..... | 26 |
| <i>Beskin G., Karpov S., Plohotnichenko V., Bondar S., Perkov A., Ivanov E., Katkova E., Sasyuk V., Shearer A.</i> Wide-Field Optical Monitoring with High Temporal Resolution as a Method to Detect Space Hazards..... | 34 |
| <i>Rykhlova L., Bakanas E., Barabanov S., Busarev V.</i> Characterisation of Physical Properties of Selected NEAs | 43 |

YOUNG RESEARCHERS' CHOICE

| | |
|---|----|
| <i>Ershov V.</i> 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. Балеге – 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. Балеге – 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. Балеге 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. Балеге 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 ко-

мет 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 км². 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 альbedo 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 быстро движущихся 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 из-

учения 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 быстро движущийся 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 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. 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 систем 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 во-

просы, 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.

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, эклиптической 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°C. 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 |
|-----------------------|-----------------|------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| $1,73 \pm 0,23$ | $0,51 \pm 0,08$ | $3,45 \pm 2,02$ | $120,62 \pm 2,77$ | $326,7 \pm 0,79$ | Zuluaga, Ferrini, 2013 |
| 1,55 | 0,5 | 3,6 | 109,7 | 326,41 | Borovicka et al, 2013 |
| $1,26 \pm 0,05$ | 0,52 | 2,984 | $95,5 \pm 2$ | $326,5 \pm 0,3$ | 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. – arXiv:1302.5377Z – arXiv:1302.5377.
- 7. Zuluaga J.I., Ferrin I., Geens S.**
The orbit of the Chelyabinsk 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. – Т. 47, № 4.
- 2. Gor'kavyj N.N., Tajdakova T.A., Provornikova E.A., Gor'kavyj I.N., Ahmetvaleev M.M.**
Ajerazol'nyj shlejf Cheljabinskogo bolida // *Astronomicheskij vestnik. Issledovanija Solnechnoj sistemy.* – 2013. – Т. 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. – Т. 47, № 4.
- 4. Grigorjan S.S., Ibdov F.S., Ibdov S.I.**
Cheljabinskij superbolid: k fizike vzryva // *Astronomicheskij vestnik. Issledovanija Solnechnoj sistemy.* – 2013. – Т. 47, № 4.
- 5. Galimov Je.M., Kolotov V.P., Nazarov M.A. i dr.**
Rezultaty veshhestvennogo analiza meteorita «Cheljabinsk» // *Geohimija.* – 2013. – № 7.
- 6. Zuluaga J.I., Ferrin I.**
A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid (англ.) // *arXiv.org.* – 2013. – arXiv:1302.5377Z – arXiv:1302.5377.
- 7. Zuluaga J.I., Ferrin I., Geens S.**
The orbit of the Chelyabinsk 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., Leshchenko L.N., Alpatov V.V., Grigor'eva S.A., Zhuravlev S.V., Kuznecov V.D., Kusionkij O.A., Lapshin V.B., Rybakov M.**
Ionosfernye jeffekty, stimulirovannye cheljabinskim meteoritom // *Astronomicheskij Vestnik. Issledovanija Solnechnoj sistemy.* – 2013. – Т. 47, № 4.
- 10. Marov M.Ja.**
Malye tela Solnechnoj sistemy i nekotorye problemy kosmogonii // *UFN.* – 2005. – Т. 175, № 6. – С. 668–678.
- 11. Shustov B.M.**
Asteroidnokometnaja opasnost': o roli fizicheskix nauk v reshenii problemy // *UFN.* – 2011. – Т. 181. – С. 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 Зульффарович
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 Магомедович
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

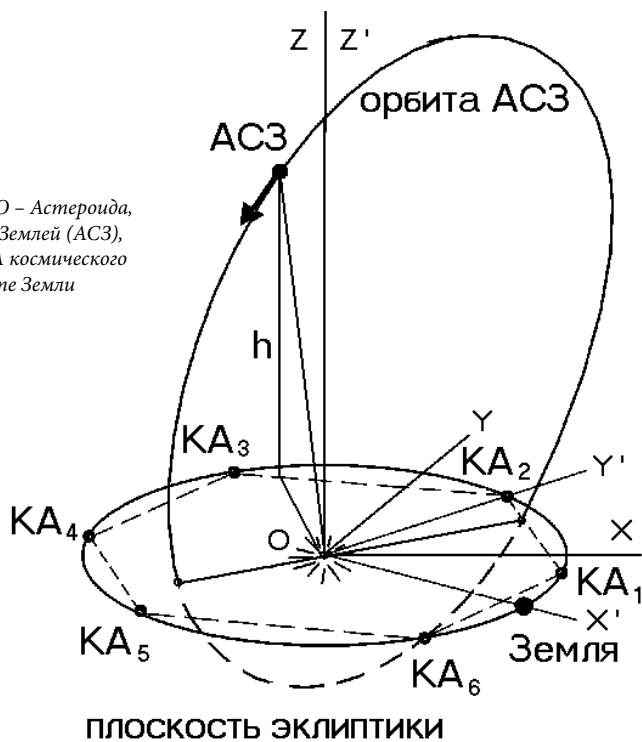


Рис. 2. Область оптического барьера, сканируемая одним телескопом по горизонтали

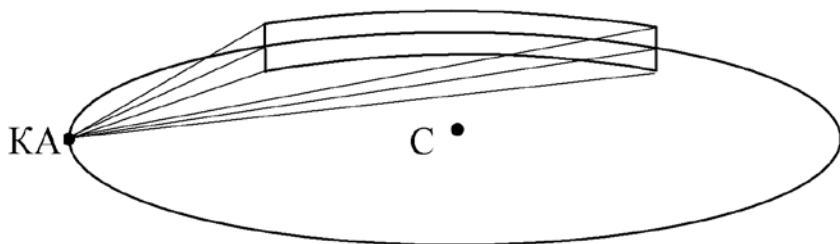
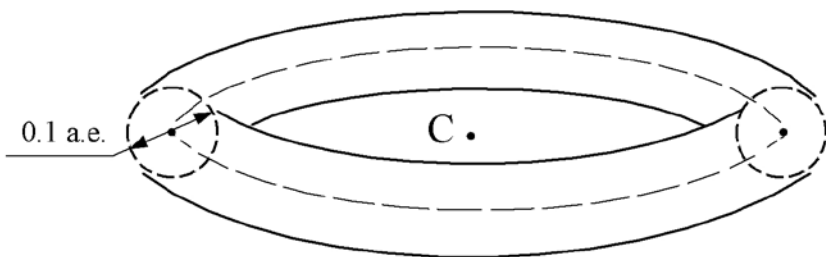


Рис. 3. Пересечение астероидом А окрестности вокруг орбиты Земли, представляющей собой тор толщиной 0,1 а.е.



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 проникающей 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.



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, сблизжающиеся 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, сблизжающихся 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 объ-

екты 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 $\approx 6 \text{ Мт}$ ($E=2,5 \cdot 10^{23} \text{ эрг}$). 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 $\approx 200 \text{ м}$ в область океана со средней глубиной $\approx 0,6 \text{ км}$ (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

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. Социокультурносфера. Постигание 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

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 современные 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 км². 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, попадающий 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, имеет высота максимального энерговыделения, которую часто и называют высотой «метеороидного 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, разбить на части, т.е. тем меньше его прочность. При движении метеороида в атмосфере он испытывает большие аэродинамические нагрузки, быстро увеличивающиеся по мере проникновения метеороида в нижние плотные слои атмосферы. Эти нагрузки раскрывают трещины, и тело теряет свою прочность, превращаясь в грудку 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 грудку 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

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/м²). Дальнейшая эволюция облака определялась атмосферными течениями в

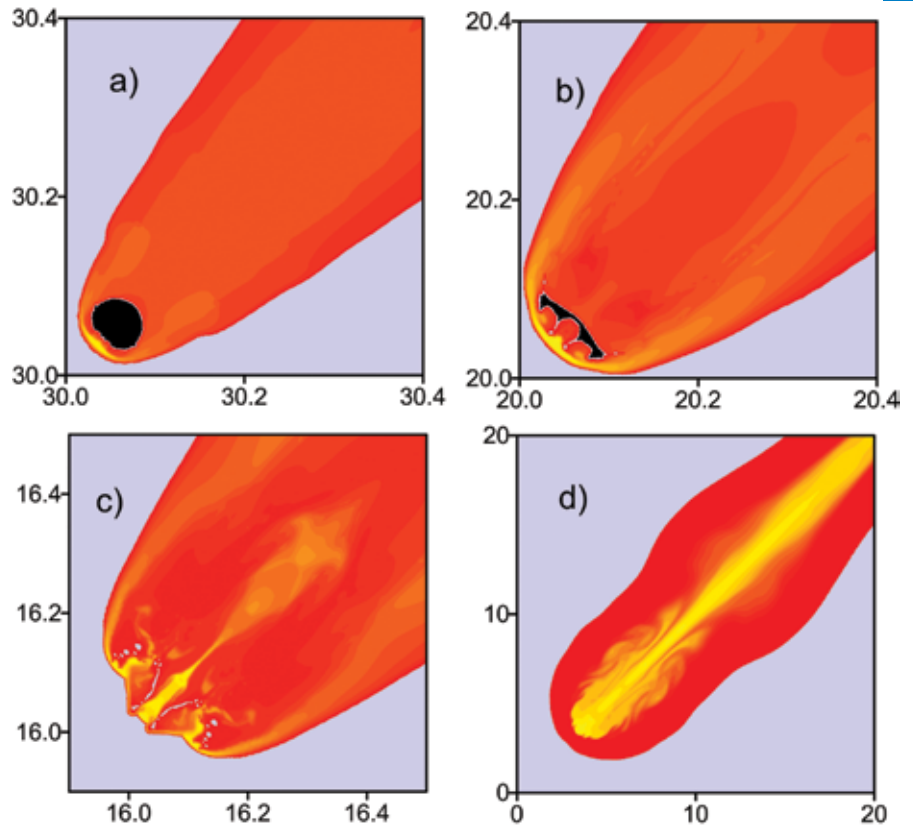


Рис. 1. Взаимодействие ТКТ с атмосферой. а) на высоте 30 км начинается фрагментация; б) на высоте 20 км тело полностью разрушается и принимает сильно расплюснутую форму с диаметром порядка 200 м; в) на высоте 16 км в результате развития неустойчивостей тело превращается в струю частиц и пара, при этом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

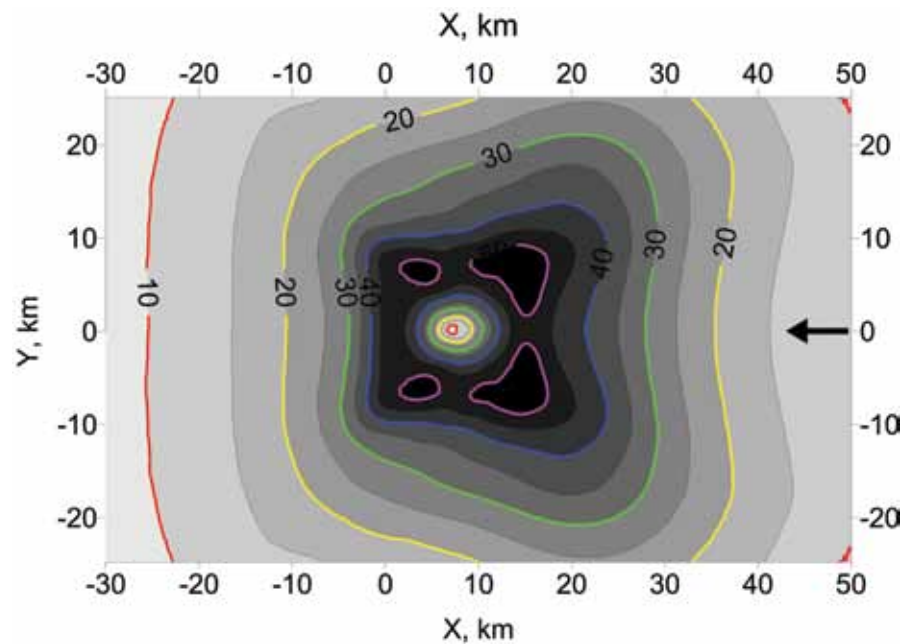


Рис. 2. Распределение скорости ветра на поверхности после удара ТКТ. Цифры около кривых показывают значение скорости ветра в м/с. Внутри фиолетового контура скорость ветра превышает 50 м/с

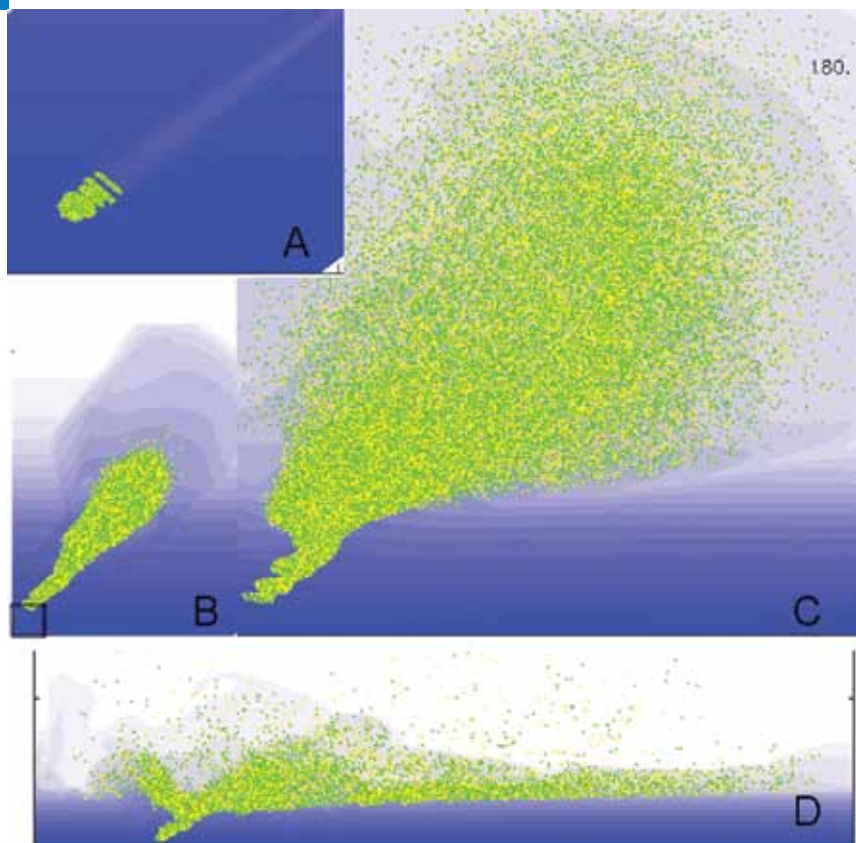


Рис 3. Эволюция взвешенного вещества в плюме, образовавшемся после удара Тунгусского КТ.

- 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

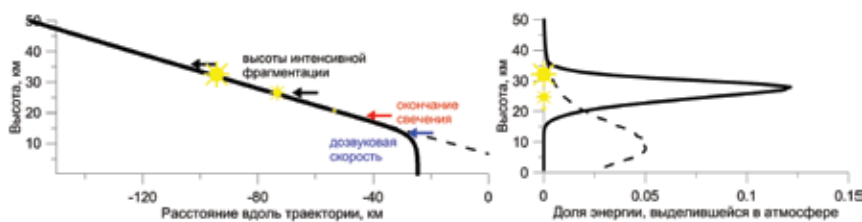


Рис 4. Траектория ЧМ (слева) и энерговыделение в атмосфере (справа), рассчитанные по модели точечной массы. Пунктирная линия показывает результаты без учета разрушения (в этом случае ЧМ достиг бы поверхности Земли со скоростью 6 км/с и образовал кратер размером порядка 300 м)

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 км² [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 двумерные 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 соответствии с моделью точечной массы

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 по-дальше 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. Artemieva 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. Shuvalov V.V., Artemieva 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., Kečliková J.**
Atmospheric fragmentation of meteoroids // *Astronomy and Astrophysics*. – 1993. – V. 279. – P. 615–626.
- 11. Shuvalov V.V.**
Multi-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. McLaughlin 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 ground 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., Рыжова 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. Borovička J., Spurný 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.

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

Бескин Г.М., Карпов С.В., Плехотниченко 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 полярироидов. 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.



ШЕРЕП
Эндрю
PhD, директор центра астрономии Национального университета Ирландии.

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 транзита, 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 разви-

тия методологии широкоугольного поиска быстрых оптических транзитов. Прежде всего, надо повысить проницаемость 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 малозумящие детекторы (матрицы с внутренним усилением, sCMOS-приемники). Вторым важным направлением развития является измерение цветов и поляризации обнаруженных транзитов 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. 16. Общий вид отдельной монтировки системы ММТ

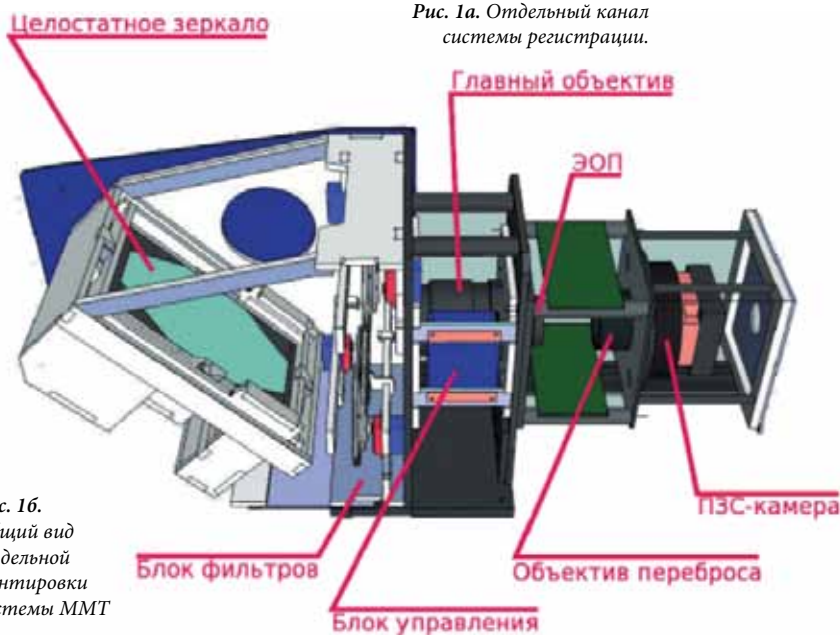


Рис. 1а. Отдельный канал системы регистрации.

Таблица 2. Технические параметры отдельного канала Mini-MegaTORTORA

| Главный объект | | ЗОП | | ПЗС-матрица | |
|----------------|------------|-----------------|--------------|----------------|---------------------------|
| Диаметр | 71 мм | Фотокагод | GaAs | Модель | SONY 2/3" 1XL285interline |
| 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 4500Å | Размер пикселя | 6,45 мкм |

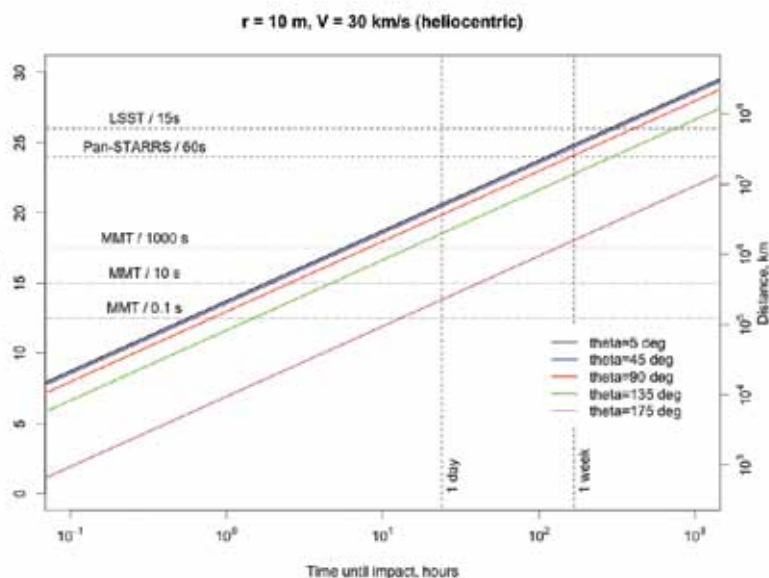


Рисунок 3. Связь между блеском объекта типа Челябинского метеорита (диаметр 20 м, типичное для хондритов альbedo 0,08), имеющего гелиоцентрическую скорость 30 км/с (параметр графика T определяет угол пересечения его траекторией орбиты Земли), со временем, оставшимся до столкновения. Горизонтальные линии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

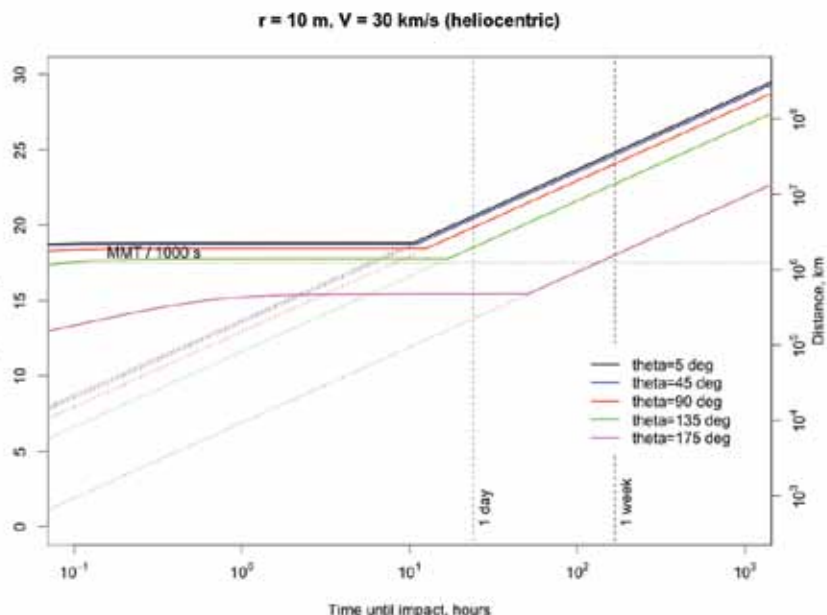


Рисунок 4. То же, что и рис. 3, но с учетом «размазывания» изображения объекта по кадру за время экспозиции из-за его движения в картинной плоскости. Для синуса угла между скоростью объекта и направлением на наблюдателя выбрано предельное значение, равное отношению размера Земли к расстоянию до метеороида (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

Таблица 4. Сравнение эффективности различных телескопов (A – зфф. 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 |

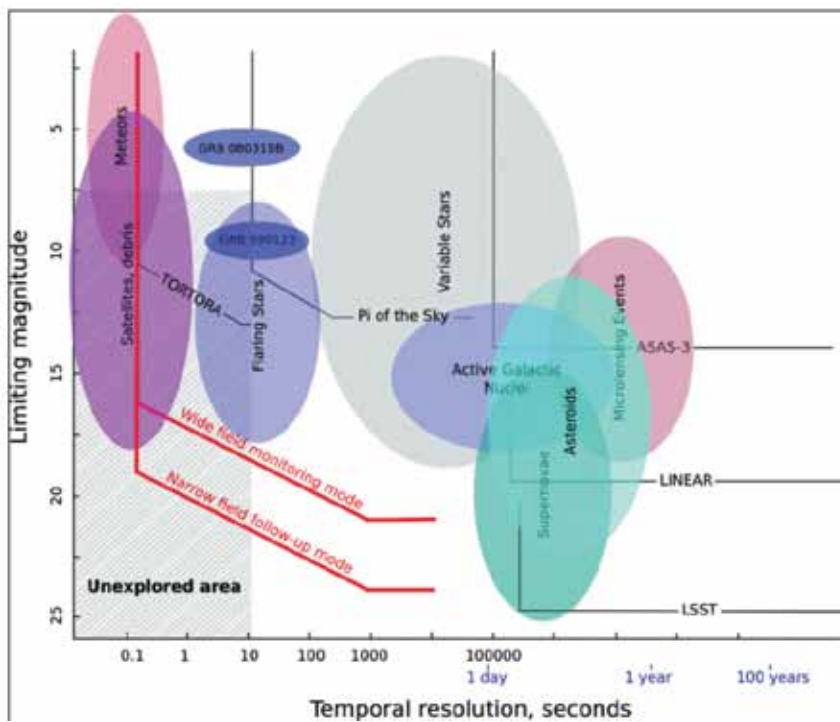


Рис. 5. Эффективность телескопа SAINT для наблюдений различных классов объектов в сравнении с таковой для других инструментов, как функционирующих в настоящее время (ASAS-3, LINEAR, Pi of the Sky, FAVOR/TORTORA), так и планирующихся на будущее (LSST)

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-

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.

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-



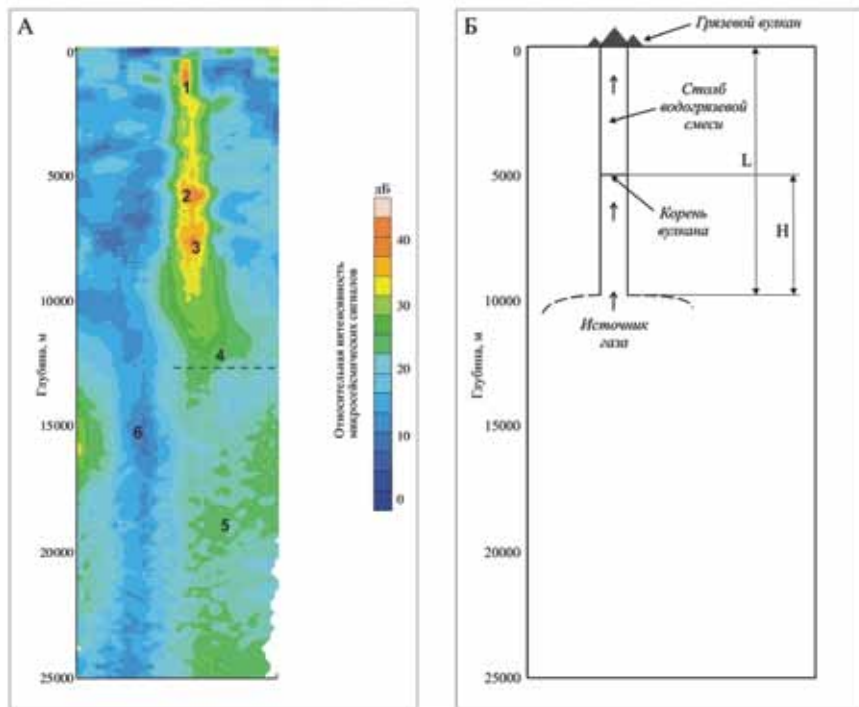
Група активных грифонов Южно-Сахалинского грязевого вулкана



ЕРШОВ

Валерий Валерьевич

научный сотрудник Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН.



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 водогазовой 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

нения 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 природе 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.

**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