

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР

На правах рукописи

ИВАНОВ Борис Александрович

УДК 550.3+551.3+523.44

МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ УДАРНЫХ КРАТЕРОВ НА ЗЕМЛЕ И ПЛАНЕТАХ

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 04.00.22 – Физика твердой Земли

Москва 2000


Работа выполнена в Институте динамики геосфер Российской Академии
Наук

Официальные оппоненты : доктор физико-математических наук,
профессор В. Н. Жарков (ОИФЗ РАН);

доктор геолого-минералогических наук
М.А. Назаров (ГЕОХИ РАН);

доктор технических наук, профессор
Б. Д. Христофоров (ИДГ РАН)


Ведущая организация - Институт механики Московского
государственного университета

Защита состоится " 8 " июня 2000 г. в 12 час. на заседании спе-
циализированного совета Д 200.39.01 в Институте динамики геосфер РАН по
адресу: 117939, Москва, Ленинский проспект 38, корпус 6. 

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института дина-
мики геосфер РАН по тому же адресу

Автореферат разослан " 29 " апреля 2000 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

 В.А.Рыбаков

В 654.041,03

Д 823.13.5

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы определяется как очевидной необходимостью исследования фундаментальных геофизических процессов в Солнечной системе в целом и на Земле в частности, так и наличием ряда практически важных прикладных задач, связанных с образованием кратеров и воронок при ударе и взрыве.

Целью исследований является установление основных закономерностей физических и геомеханических процессов при ударном и взрывном кратерообразовании, и их использование для решения ряда конкретных задач изучения геологической истории и эволюции Земли и других планетных тел Солнечной системы, включая астероиды.

Основными задачами данной работы являлись:

1. Анализ процесса кратерообразования как закономерной последовательности явлений и создание адекватных моделей для их описания.
2. Формулировка законов подобия для основных параметров кратерообразующих ударных процессов.
3. Поиск модели поведения разрушенной горной породы вокруг растущего кратера, позволяющей понять процесс формирования сложных ударных кратеров с центральным поднятием.
4. Использование законов подобия для решения конкретных задач исследования последствий кратерообразующих ударов на Земле и других планетах, таких как:
 - анализ предпосылок для глобального изменения климата за счет гигантского удара на границе мела и палеогена (так называемое КТ-событие);
 - анализ данных бурения сверхглубокой скважины (глубиной более 5 км) в центральном поднятии Пучеж-Катунского метеоритного кратера;
5. Идентификация и изучение ударных кратеров Венеры по данным КА "Венера-15,16" и "Магеллан".
6. Анализ возможных причин образования "кратеров-крепостей" на Марсе.
7. Нахождение распределения по размерам ударников, образовавших кратеры на планетах земного типа; сравнение этого распределения с распределением по размерам астероидов главного пояса.

Методы исследования включали лабораторное и численное моделирование ударного и взрывного кратерообразования, дополненное изучением геологических и геофизических данных об ударных кратерах на Земле и других планетах.

На защиту выносятся следующие результаты:

- схематизация движения среды при ударном кратерообразовании (зет-модель), создающая удобный аналитический аппарат для анализа экспериментальных данных;
- система законов подобия главных параметров ударного процесса для широкого диапазона масштабов явления;
- решение на основе разработанных законов подобия ряда конкретных задач, включающих изучение гипотезы о глобальной катастрофе на границе мела и палеогена в результате образования ударного кратера Чиксулуб.

- построение модели образования Пучеж-Катунского метеоритного кратера и анализ на ее основе геолого-геофизических данных, полученных при бурении Воротиловской сверхглубокой скважины.- обнаружение, распознавание и анализ строения ударных кратеров Венеры;
- подтверждение гипотезы об образовании "кратеров-крепостей", обнаруженных на Марсе, за счет включения воды и льда в состав выбросов из кратеров;
- построение по данным о кратерах распределения по размерам тел-ударников на орбитах столкновения с планетами; доказательство стабильности этого распределения в последние 4 млрд. лет и его подобия распределению по размерам астероидов главного пояса.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- впервые была создана аналитическая модель движения среды при образовании кратера в результате высокоскоростного удара или взрыва вблизи поверхности;
- предложена и апробирована модель динамического снижения сухого трения в породах, окружающих растущий кратер, за счет относительного колебания блоков пород, составляющих зону разрушения. С использованием данной модели путем численного моделирования впервые воспроизведены закономерности усложнения морфологии ударных кратеров по мере роста их размера на данной планете;
- обоснован закон подобия (приведения) для кратеров, образующихся в результате высокоскоростного удара или взрыва вблизи поверхности;
- открыты ударные кратеры на Венере (во взаимодействии с группой геолого-геофизического анализа АН СССР, созданной для анализа данных по проекту "Венера 15/16");
- обоснована возможность глобального изменения климата в результате катастрофического ударного события на границе мела и палеогена (КТ-граница);
- предложена гипотеза, объясняющая природу "кратеров-крепостей" на Марсе;
- доказано подобие в распределении по размерам астероидов главного пояса и тел на орбитах, пересекающих орбиты планет, откуда следует независимость от размера тел механизма, пополняющего популяцию тел на орбитах столкновения с планетами.

Достоверность основных результатов подтверждается данными экспериментов и сравнением с известными данными геолого-геофизического изучения ударных кратеров на Земле и других планетах, включая материалы глубинного бурения и данные полетов космических аппаратов (КА) к другим планетам Солнечной системы.

Личный вклад автора состоит

- в выборе и обосновании направления исследований;
- в формулировании основных идей и общего методического подхода к установлению основных характеристик воздействия высокоскоростных

ударов на твердую и оболочку Земли и других планет Солнечной системы;

- в создании зет-модели движения среды при образовании кратера в результате высокоскоростного удара или взрыва вблизи поверхности;
- в открытии и доказательстве ударного происхождения метеоритных кратеров на Венере
- в решении ряда конкретных задач, связанных с ударным кратерообразованием.

Практическая значимость. В работе проведено изучение фундаментального для эволюции Земли и планет Солнечной системы явления ударного кратерообразования. В результате исследований получены новые данные о природных ударных процессах, важных для понимания геологической истории планетных тел и их спутников. Создана методологическая основа для использования данных об ударных кратерах для таких фундаментальных задач сравнительной планетологии как, например, оценка возраста поверхности по плотности ударных кратеров, накопленных за время ее существования. Предложены модели ударного процесса для анализа и обобщения геолого-геофизических данных, получаемых при изучении земных ударных кратеров, в том числе, с использованием глубинного бурения.

Апробация работы. Результаты, собранные в диссертации неоднократно складывались на семинарах Спецсектора ИФЗ (позднее - ИДГ РАН) в 1975 - 1999 гг., на ежегодных конференциях по исследованию Луны и планет в г. Хьюстоне, Техас, США (Lunar and Planetary Science Conference) в 1989-99 гг., на Всесоюзных Метеоритных конференциях в 1976-1994 гг., на ежегодных Рабочих встречах по сравнительной планетологии (Brown-Vernadsky Microsymposium) в ГЕОХИ РАН и Университете Брауна, г. Провиденс, Род-Айленд, США, в 1985-1999 гг., на рабочих встречах по исследованию земных ударных кратеров, организованных Европейским научным фондом (Нордлинген, Германия - 1993 г., Остерзунд, Швеция - 1994 г., Лимож, Франция - 1994 г., Анкона, Италия - 1995 г., Бремерхаузен, Германия - 1999 г., Киллан, Франция, 1999 г.), на сессии КОСПАР (Гаага, Нидерланды - 1991 г.), на Генеральной ассамблее Европейского геофизического союза (Висбаден, Германия - 1993 г., Гамбург, Германия - 1995 г., Гаага, Нидерланды - 1996 и 1999 гг.), и на других семинарах и рабочих встречах. В ходе исследований автор пользовался поддержкой Международного Научного Фонда (грант № M9S000) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 94-05-16329 и 96-05-64167).

Благодарности. М.А. Садовский, В.Н. Родионов и В.Н. Костюченко обратили внимание автора на важность задач взрывного кратерообразования, чем определили круг его научных интересов на следующие 25 лет; в течение долгих лет они внимательно и требовательно следили за ходом работ, за что автор им глубоко благодарен. Автор высоко ценит помощь и советы А.П. Сухотина в организации лабораторных экспериментов.

Автор выражает глубокую признательность А. Т. Базилевскому за постоянное внимание к работе и большую помощь в исследовании ударных кратеров на Земле и других планетах. Большую помощь автору оказали советы

К.П.Флоренского и его сотрудников из Лаборатории сравнительной планетологии ГЕОХИ АН СССР (позднее -РАН). Автор благодарен коллегам по Рабочей группе по геолого-геоморфологическому анализу радиолокационных изображений поверхности Венеры за помощь и тесное сотрудничество, а также О. Н. Ржиге за ценные консультации. Своим долгом автор считает выражение благодарности коллективам ИРЭ АН СССР, СКБ МЭИ и другим организациям, сделавшим возможным получение радиолокационных изображений поверхности Венеры.

Исследование ударных кратеров Земли, включая многолетние полевые экспедиционные работы, было бы невозможно без помощи В.И. Фельдмана, Л.Б. Грановского и их коллег из Кратерной партии Геологического факультета МГУ.

Автор глубоко благодарен за постоянную помощь В.Л. Масайтису и его сотрудникам из ВСЕГЕИ им. Карпинского (СПб).

Автор благодарен Л.А. Певзнеру и его сотрудникам (НПО "Недра", г. Ярославль) за помощь в ознакомлении с материалами по Воротиловской сверхглубокой скважине.

Автор выражает глубокую благодарность Дж. Мелосу (Аризонский университет, г. Туссон, США) за помощь в освоении методов численного моделирования кратерообразования.

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения.

Во введении сделан обзор достижений в понимании процессов ударного кратерообразования, сформулировано научное направление диссертационной работы, обоснована актуальность решаемых задач, определены цели исследования и изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена механике образования воронок и кратеров при ударе и взрыве.

Наиболее заметным остаточным результатом взрыва или удара по твердой поверхности планеты является образование кратера или воронки. В отечественной литературе сложилась традиция, согласно которой различают *воронки*, образованные взрывом химических взрывчатых веществ (ВВ) или ядерных устройств, и *кратеры*, возникающие на поверхности мишени при ударе быстролетящих тел. В английской литературе принят единый термин «кратер» (crater). Совокупность процессов образования кратеров (воронок) удобно определить единым термином "кратерообразование" (для которого в прикладных работах часто используется синоним "воронкообразование"). Конечный кратер (воронка) формируется последовательностью процессов, включающих стадию передачи энергии источника (взрыва или высокоскоростного удара) в материал мишени, распространение в мишени ударных волн, рост полости кратера и выброс материала мишени и, наконец, модификацию переходной полости в конечное (наблюдаемое) состояние. В данной главе излагаются результаты исследования механики процессов кратерообразования, описывающей рост полости и выброс материала мишени из полости растущего кратера.

Проблема образования воронок при взрыве на выброс была детально изучена в 1950х-80х годах. Важную роль в анализе экспериментальных результатов сыграла кинематическая модель радиального движения грунта. Тогда же были

сделаны попытки применить аналогичный подход к описанию образования ударных кратеров в предположении о том, что высокоскоростной удар можно представить как взрыв заглубленного заряда. Однако экспериментальные исследования указывали на более сложный характер движения при ударе и контактном взрыве. Позднее результаты лабораторных экспериментов и численных расчетов показали, что и для ударно-взрывного кратерообразования можно предложить кинематическую модель, аналогичную по простоте и полезности модели радиального движения грунта при взрыве на выброс.

Такая модель была разработана в начале 70-х годов независимо в СССР (автором настоящей работы) и в США, где она получила название "Z-модель" (или, в русском написании, "зет-модель"). Первые открытые публикации появились, по-видимому, одновременно в 1976 г. в абстрактах Симпозиума по механике кратерообразования на планетах (Аризона, Флагстаф, 13-17 сентября 1976 г.) и на следующий год [Maxwell, 1976; Allen, 1976; Ivanov 1976; Ivanov and Comissarova, 1977]. Только в 1994 г. в России удалось ознакомиться с основным американским отчетом по зет-модели [Maxwell and Seifert, 1974]. Стало очевидным, что уже в 1974 г. Максвелл и Сейферт разработали основные приложения, которые в России были опубликованы в открытой печати в 1979 г. [Иванов, 1979].

Первоначальные [Ivanov 1976] российские варианты зет-модели назывались "Интегрально сбалансированное течение" и "Простая модель кратерообразования" [Ivanov and Comissarova, 1977; Иванов, 1979]. Поскольку чаще всего для обозначения показателя степени при скорости использовалась буква Z, модель получила окончательное название "Z-модель" ("зет-модель").

Для Максвелла и Сейферта [Maxwell and Seifert, 1974] отправной точкой послужили численные расчеты контактных взрывов, выявившие специфическую геометрию поля скоростей на поздних стадиях кратерообразования. Наш подход базировался в основном на экспериментах [Иванов, 1977, 1979], поставленных так, что взрыв в песке развивался у прозрачного окна, позволяя изучать перемещение материала «в разрезе». Скоростная киносъемка фиксировала рост воронки и перемещение частиц маркеров (рис.1). Эти опыты позволили выделить основные фазы образования воронки при контактном взрыве: начальный рост почти полусферической полости, остановку роста воронки вглубь при продолжающемся за счет выброса росте радиуса воронки.

Геометрия движения грунта, зафиксированная экспериментально, позволила сделать два главных предположения, лежащих в основе зет-модели: в полярных координатах, таких что угол отсчитывается от направления вертикально вниз,

(1) радиальная скорость течения может быть представлена степенным законом затухания с расстоянием от эпицентральной точки ;

(2) тангенциальная скорость определяется из законов сохранения (в простейшем случае - из закона сохранения массы).

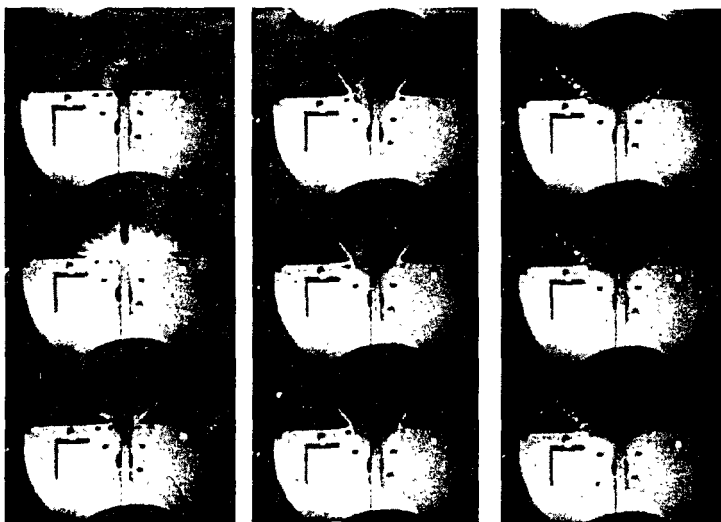


Рис. 1. Избранные кадры киносъемки контактного взрыва во влажном песке у прозрачного окна. Скорость съемки - около 1000 кадров/с. Слева - момент детонации заряда, в центре - 10 мс после взрыва, справа - 100 мс после взрыва.

В полярных координатах (R, θ) глубина z выражается как $z = R \cos \theta$ а радиальное расстояние от оси симметрии r как $r = R \sin \theta$, вектор скорости течения имеет радиальную v_R и тангенциальную v_θ составляющие, причем можно считать, что величина v_R не зависит от угла θ и является убывающей степенной функцией только расстояния до центра координат R :

$$v_R \sim R^{-2} \quad (1a)$$

При постулировании зависимости $v_R(R)$ в виде (1a) из условия несжимаемости следует, что v_θ зависит от расстояния R также как и v_R , а при фиксированном R плавно увеличивается от нулевого значения на оси симметрии $\theta = 0$ до максимального значения на свободной поверхности:

$$v_\theta = (Z-2) v_R (1 - \cos \theta) / \sin \theta \quad (16)$$

При задании поля скоростей в виде (1a, б) траектории движения частиц среды имеют вид

$$R = R_l [(1 - \cos \theta) / (1 - \cos \theta_l)]^{1/(Z-2)} \quad (2)$$

где R_l и θ_l - координаты произвольной точки, фиксирующей данную траекторию.

Уравнение (2) ясно демонстрирует, что форма траекторий не зависит от времени, так что траектории являются неподвижными линиями тока (при том что движение частиц по этим траекториям не является стационарным). Вращение двух соседних траекторий вокруг оси симметрии определяет трубку тока, по которой происходит выброс материала из воронки.

Если маркировать траектории точкой их выхода на уровень исходной поверхности:

$$R_l = r_e, \quad \theta = 90^\circ$$

то согласно зет-модели, грунт выбрасывается из воронки по траекториям, описываемым уравнением

$$R = r_e (1 - \cos \theta)^{1/(Z-2)} \quad (3)$$

где r_e - точка выхода траектории на поверхность. Показатель степени Z чаще всего лежит в диапазоне от 2,5 до 3.

В результате довольно сложная картина движения вещества при образовании кратера (воронки) при высокоскоростном ударе или взрыве вблизи поверхности может быть представлена в схематизированном виде (рис. 2).

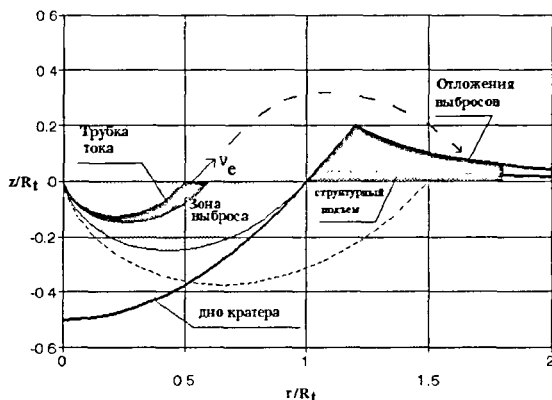


Рис. 2. Схема описания выброса вещества из кратера и образования слоя отложений выбросов. Левая вертикальная ось является осью цилиндрической симметрии.

Создание простой модели кинематики движения позволило проанализировать ряд важных задач механики кратерообразования без применения сложных методов численного моделирования. В 70-х и 80-х годах зет-модель использовалась для описания различных процессов образования воронок при взрыве вблизи поверхности и ударных кратеров:

- для анализа образования воронки (переходной полости) в идеально-пластической среде, описываемой моделью Мизеса [Иванов, 1983]. Аналогичная модель была разработана Максвеллом и Сейфертом [Maxwell and Seifert, 1974];
- для разделения гравитационного и прочностного режимов образования воронок и кратеров [Иванов, 1979; Ivanov, 1976; Иванов, 1981]. Такой же подход был позднее разработан Шмидтом и Холсэпплом [Holsapple and Schmidt, 1979; Schmidt, 1980];
- для разработки простой функциональной формы закона подобия, описывающего образование ударных кратеров на планетах в широком диапазоне масштаба [Neukum and Ivanov, 1994];
- для оценки баланса массы и разработки модели формирования покрова выбросов [Иванов, 1979]. Из этого исследования стало очевидным, что для всех гравитационных кратеров и воронок радиальные профили толщины за-

кратерного вала должны быть геометрически подобны. Такой же результат был получен в работе [Housen et al., 1983].

В диссертационную работу включены лишь некоторые примеры применения зет-модели, используемые в последующих главах. Описаны такие задачи как:

- образование кратера в идеально-пластической среде (раздел 1.1.3);
- образование кратера в поле тяжести (раздел 1.1.4);
- выгеснение грунта под кратером и образование структурного подъема - основания вала кратера (раздел 1.1.5)
- зет-модель движения грунта под воронкой с учетом дилатансии (раздел 1.1.6).

Построение более детальной картины кратерообразования в реальных средах требует применения методов физического и математического моделирования. Для изучения природного кратерообразования эксперименты на мишенях из реальных горных пород имеют ограниченную ценность из-за больших различий прочностных свойств лабораторных образцов и больших массивов реальных горных пород. Хотя лабораторные эксперименты с реальными и модельными грунтами сохраняют свое значение для понимания дробления горных пород при кратерообразовании, все большую роль в современных исследованиях играет численное моделирование ударных событий, которое позволяет изучать крупномасштабные ударные события, недоступные прямому физическому моделированию: столкновение астероидов, образование ударных кратеров диаметром в десятки, сотни и тысячи км.

Во второй части первой главы излагаются численные методы, использованные автором, и некоторые результаты расчетов. Для решения разностных уравнений гидродинамики в плоской или осесимметричной геометрии использовалась лагранжево-эйлерова программа (the Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian code - SALE), разработанная в Лос Аламосе [Amsden et al., 1980]. Программа имеет блок адвекции, что дает возможность использовать как эйлерово представление расчетной области, так и смешанное лагранжево-эйлерово представление. Возможен, конечно, и чисто лагранжев расчет. Исходная программа была усовершенствована для описания движения нескольких веществ в эйлеровом представлении (возможно наличие двух различных веществ и вакуума в одной расчетной ячейке). Для сохранения информации о перемещении лагранжевых частиц в начальную расчетную сетку вводились частицы-маркеры, движение которых интегрировалось по интерполированным значениям скорости. Для частиц-маркеров запоминались также интерполированные значения плотности, давления и внутренней энергии вещества.

Помимо задач о кратерообразовании в работе решаются также задачи о моделировании пролета космических тел через атмосферу. Для этого граничные условия на нижней границе вычислительной сетки обеспечивают приток газа с соответствующим свободным оттоком на верхней границе. Первоначально скорость притока равна входной скорости метеороида. Плотность втекающего газа увеличивается в соответствии с текущей вычисленной высотой над поверхностью планеты.

Использовались уравнения состояния горных пород в форме уравнений Тиллотсона [Tillotson, 1962] и табличные уравнения состояния.

Для описания прочностных свойств горных пород использовались модели прочности на сдвиг и отрыв.

Глава 2 посвящена законам подобия при ударном кратерообразовании. Этот вопрос имеет принципиальное значение при исследовании природных ударных событий, поскольку экспериментальные исследования возможны только в малом масштабе и при относительно низких скоростях удара. В работе последовательно рассмотрены законы подобия для стадии возбуждения и распространения ударных волн, роста переходной полости и стадии модификации ударного кратера, на которой формируется окончательная морфология кратера.

Идеология рассмотрения подобия для параметров ударной волны опирается на теорию короткого удара, сформулированного Я. Б. Зельдовичем в 1956 г. Эта задача в полной мере применима для сильных ударных волн, сжатие на фронте которых близко к предельному сжатию однократной ударной волной. Для практически важного диапазона давлений, сравнимых с величиной модуля объемного сжатия горных пород (40...80 ГПа), обобщены многочисленные опубликованные результаты численных расчетов высокоскоростного удара. Показано, что для широкого диапазона параметров удара затухание давления на фронте ударной волны под центром удара можно аппроксимировать в виде (Иванов, 1981):

$$\left(\frac{P}{\rho c_0^2}\right) = (3 \pm 1) \left(\frac{z}{L}\right)^{-2.5} \quad (4)$$

где параметр эффективности L можно записать в виде

$$L = D_p (\rho/\delta)^n (v/c_0)^m. \quad (5)$$

Здесь ρ - плотность вещества ударника, δ - плотность вещества мишени, v - скорость удара, c_0 - скорость звука в материале мишени, D_p диаметр ударника. Для типичных горных пород $n = 1/3$, $m = 0.58$. Формулы (4) и (5) позволяют делать практически важные оценки в случаях отсутствия прямых расчетов. Они применимы для событий любого масштаба.

Для обобщенного описания роста переходной полости в работе построено приближенное автомодельное решение, в котором предполагается, что на всех стадиях роста полости вплоть до полной остановки кратерообразующее течение можно описать зет-моделью (см. главу 1). На основе кинематики зет-модели, в модельном решении получены выражения для диссипации начальной кинетической энергии кратерообразующего течения в тепловую (за счет работы против сил прочности и трения) и потенциальную (за счет перемещения в поле тяжести). Исчерпание начального запаса энергии определяет остановку кратерообразующего течения в модельном решении. Данное модельное решение позволяет предложить форму законов подобия, единую для прочностных и гравитационных кратеров, параметры которых могут быть определены из экспериментальных данных. Например, зависимость для диаметра кратера в широком диапазоне масштаба события может быть записана в виде

$$\frac{D}{CP} = \left[\frac{B_p}{g(D_{sg} + D)} \right]^{-m/2} \quad (6),$$

где все параметры ударника собраны в обобщенный параметр эффективности

$$CP = D_p (\delta/\rho)^n v^m, \quad (7)$$

близкий по форме к соотношению (5), но не зависящий в первом приближении от сжимаемости вещества мишени, G – ускорение силы тяжести, диаметр D_{sg} определяет эффективную границу между прочностными и гравитационными кратерами, B_D – экспериментально определяемый коэффициент. Значения показателей степени n и m могут быть в первом приближении приняты такими же, как и в (5). При взрывах с одинаковым расположением заряда относительно свободной поверхности роль CP играет обычная величина $q^{1/3}$ (q – масса заряда ВВ). На рис. 3 показан пример зависимости вида (6) для радиуса врынных воронок в сравнении с экспериментальными данными.

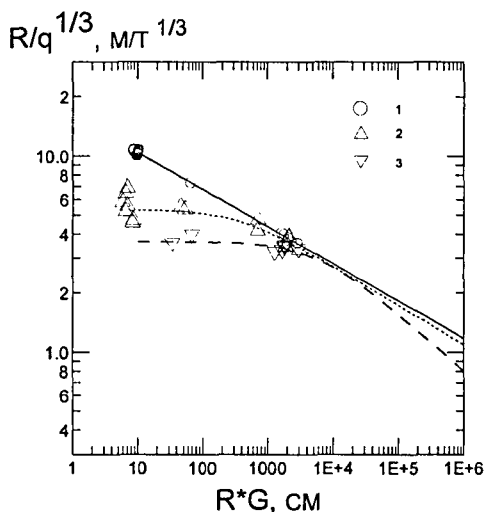


Рис. 3. Зависимость приведенного радиуса воронок в сухом песке (1), влажном аллювии (2) и пластилине (3) по данным центробежного моделирования [Schmidt and Housen, 1987]. G – отношение ускорения силы тяжести к земному значению 9.8 м/с^2 .

Проведенные в работе численные расчеты позволили определить глубину переходной полости для различных моделей прочностных свойств вещества мишени.

Модификация переходной полости анализируется в заключительном разделе Главы 2. Вначале излагается феноменологическая модель увеличения диаметра переходной полости за счет ее обрушения в поле тяжести, а затем анализируется подход к объяснению механики этого процесса. Приводятся геологические свидетельства подъема дна кратера при коллапсе переходных полостей с размером, большим некоторой критической величины. Этот эффект представляет собой достаточно интересное геомеханическое явление, которое невозможно объяснить без предположения о временном уменьшении коэффициента трения в породах, окружающих формирующийся ударный кратер. В работе предложена модель колебания крупных блоков, являющаяся развитием предложенной ранее концепции «акустической флюидизации».

В модели колебания крупных блоков предполагается, что за счет относительного колебания блоков в зоне разрушения периодически происходит относительное проскальзывание блоков относительно друг друга при сдвиговой нагрузке, меньшей значения статической прочности, возникающей за счет трения. Предложенная аналитическая формулировка определяющих соотношений описывает блочную среду с внутренними колебаниями как нелинейный бингамовский материал, имеющий конечную прочность и текущий как жидкость с нелинейной вязкостью при превышении этого предела прочности. По мере затухания относительных колебаний такая блочная среда возвращается к нормальной статической модели прочности.

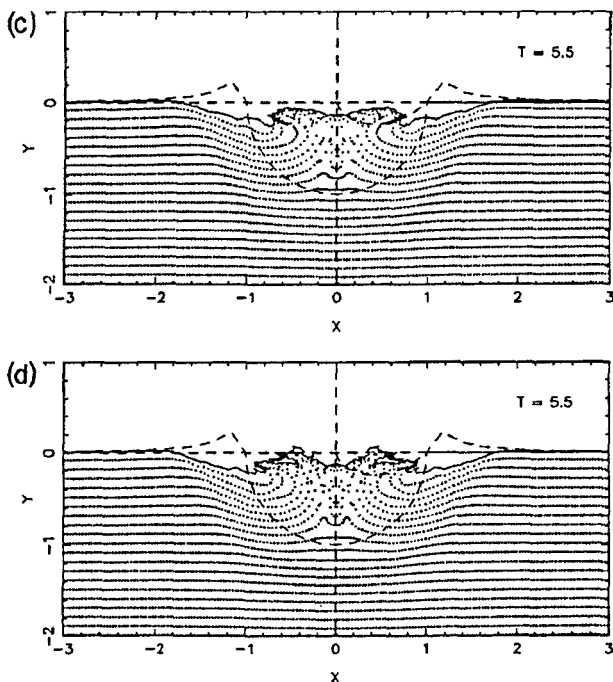


Рис. 4. Результаты использования модели блочной среды в численном моделировании стадии модификации крупных метеоритных кратеров. Линейные размеры указаны в единицах глубины H , переходной полости перед обрушением; время – в единицах $(H/g)^{1/2}$, где g – ускорения силы тяжести. При $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ верхний рисунок соответствует диаметру кратера 40 км, нижний – 80 км.

Аналитическая модель течения больших блоков была использована в численных расчетах коллапса переходной полости. Параметры модели были подобраны из условия наилучшего воспроизведения строения хорошо изученного Пучеж-Катунского кратера (подробно описанного в Главе 3). Предложен также закон подобия для использования модели для кратеров других размеров. Ис-

пользование данной модели в численных расчетах впервые позволило воспроизвести близкую к наблюдаемой картину строения крупных ударных кратеров с центральным поднятием (рис. 4).

В главе 3 рассмотрены конкретные примеры способов изучения двух земных метеоритных кратеров с использованием законов подобия и методов численного моделирования. Многообразие геологических условий, в которых происходит кратерообразование на Земле, и процессов, происходящих в земных геосферах под действием метеоритного удара, обуславливает необходимость индивидуального изучения каждого крупного ударного события. В данной работе приведены два примера такого изучения.

Ударная структура Чиксулуб (полуостров Юкатан, Мексика) диаметром около 200 км является наиболее молодым (65 млн. лет) ударным кратером такого размера на Земле. Помимо размера эта структура выделяется характерным строением мишени: фундамент кристаллических пород в данном месте перекрыт мощным (до 3 км) чехлом осадочных пород, в который входит значительное (до 15 %) количество ангидрида. По своему возрасту кратер Чиксулуб находится на границе мела и палеогена, что (наряду с другими свидетельствами) послужило основой гипотезы о том, что именно ударное событие привело к глобальной климатической катастрофе, следствием которой явилось массовое вымирание флоры и фауны в биосфере Земли. В составе коллектива исследователей автором был впервые проведен расчет массы серосодержащих газов, которые могли быть вброшены в атмосферу и стратосферу при образовании кратера Чиксулуб. Для этого по законам подобия был оценен размер ударника, необходимого для образования кратера такого размера при типичных скоростях удара, и проведены расчеты начальной фазы ударного события с высоким разрешением. Результаты расчетов показали, что за счет ударной дегазации осадков при разгрузке от ударных давлений порядка 100 ГПа (1 Мбар) в атмосферу и стратосферу могло выделиться от 2×10^{17} до 10^{18} г серы [Ivanov et al., 1986]. Данные моделирования были впоследствии использованы в модели прозрачности атмосферы, которые показали возможность глобального похолодания длительностью в несколько лет («ударная зима») [Pope et al., 1997].

Пучеж-Катуникский ударный кратер диаметром около 40 км (по реконструированному гребню вала) расположен севернее г. Нижний Новгород. Интерес к этой структуре, нетипичной для Русской платформы, в последние 10 лет был связан с бурением Воротиловской скважины глубиной около 5 км, что позволило впервые изучить внутреннее строение кратера. Мишень в месте расположения структуры представляет собой слой осадочных пород, горизонтально залегающий на кристаллических породах фундамента. Морфологически структура представляет собой кратер с центральным поднятием (получившим название Воротиловского выступа), которое представляет собой породы кристаллического фундамента, поднятые не менее чем на 2 км над первоначальным уровнем залегания. Структура перекрыта тонким слоем четвертичных пород и окружена мелкой зоной приповерхностных нарушений с внешним диаметром порядка 80 км.

В работе построена полная модель процесса формирования структуры в результате удара астероида диаметром порядка 2 км. Сравнение результатов моделирования с данными геологических и геофизических исследований полностью доказывает ударное происхождение структуры [Ivanov, 1994].

Моделирование Пучеж-Катунского ударного события включает:

- оценку кинетической энергии ударника при типичной скорости удара;
- расчет распространения ударной волны в слоистой мишени;
- оценку объема ударного расплава пород фундамента;
- расчет конфигурации зоны разрушения под кратером;
- моделирование стадии модификации как с традиционной моделью прочности в зоне разрушения, так и с использованием модели временного снижения трения за счет внутренних колебаний в зоне разрушения (см. главу 2).

Моделирование ударного события привело к постановке ряда новых задач в интерпретации геолого-геофизических данных. В частности, специальное изучение керна скважины выявило блочное строение Воротиловского выступа. Характерный размер блоков кристаллических пород здесь оценивается величиной порядка 100 м, что послужило отправной точкой для моделирования стадии модификации кратера. Использование законов подобия позволило оценить динамику растекания выбросов из кратера (см. главу 5), и подтвердить гипотезу об образовании зоны приповерхностного разрушения мишени (кольцевой террасы диаметром 80 км) за счет динамической эрозии в базальной зоне течения.

Совместный анализ результатов геолого-геофизического изучения Пучеж-Катунской структуры (включая Воротиловскую скважину) и данные численного моделирования показывает высокую степень достоверности интерпретации структуры как крупного метеоритного кратера.

В главе 4 приведены избранные результаты исследований ударных кратеров на Венере. Эти исследования были начаты автором в 1983 г. в составе Группы по геологической интерпретации радиолокационных изображений, полученных в ходе полета КА «Венера 15» и «Венера 16». Именно в ходе этой работы было впервые в мире доказано существование ударных кратеров на поверхности Венеры и изучены основные особенности процессов ударного кратерообразования на планете со столь мощной атмосферой [Ivanov et al., 1986].

Изображения венерианской поверхности, полученные радаром бокового обзора КА "Венера-15" и "Венера-16" имели разрешение от 1 до 2 км, включая покрытие больших областей стереоизображениями, которые позволили провести надежную идентификацию около 150 ударных кратеров и представить доказательства их ударного происхождения. Радарные изображения показали наличие кратеров с морфологией подобной ударным кратерам Луны, Меркурия, Марса и других планетных тел. Разрешение полученных изображений позволило надежно идентифицировать кратеры с диаметром около 10 км, а в некоторых случаях до 4-5 км. Самые большие идентифицированные кратеры имели диаметр от 100 до 140 км. Кратеры расположены поверх различных геологических образований, включая плоские равнины, горные области, вулканические плато, и складчатые равнины.

В целом по результатам фотогеологического дешифрирования изображений, построенных по данным с КА "Венера-15" и "Венера-16" были сделаны следующие выводы:

- обнаруженные на Венере круговые образования подобны кратерам на других планетах по морфологии (наличие валов, центральных гор и/или кольцевых гор в диапазонах диаметров, ожидаемых для силикатной планеты с данным ускорением силы тяжести);

- рассматриваемые круговые образования случайным образом наложены на различные типы местности и не имеют областей концентрации, характерных для вулканических и/или тектонических кольцевых структур;

- распределение рассматриваемых круговых образований по размерам отвечает типичному распределению ударных кратеров с поправкой на экранирующее влияние атмосферы Венеры;

- зависимость глубины рассматриваемых круговых образований от их диаметра соответствует ожидаемой при данной силе тяжести на поверхности.

Таким образом, по совокупности морфологических, морфометрических и статистических характеристик было доказано, что на Венере существуют ударные кратеры, и их наличие может быть использовано для оценки возраста поверхности Венеры. Спустя 10 лет эти выводы были полностью подтверждены результатами обработки данных КА "Магеллан", передавшего радиолокационные изображения поверхности Венеры с разрешением в 10 раз большим, чем у изображений "Венеры-15/16".

В ходе изучения радиолокационных снимков Венеры автором была предложена оригинальная методика оценки глубины кратеров методом смещенного изображения. Используя особенности алгоритма построения изображений поверхности по отраженным сигналам радиолокатора бокового обзора удалось, в предположении о круговой симметрии кратеров, оценить их глубину. Для диапазона диаметров кратеров $8 \text{ км} < D < 64 \text{ км}$ полученные данные можно аппроксимировать выражением

$$d_a = 0.2 D^{0.34 \pm 0.07}$$

где d_a – глубина дна кратера относительно уровня окружающей местности, км, а D – диаметр кратера по гребню вала, км. Позднее в ходе сотрудничества по проекту «Магеллан» эти данные были подтверждены и дополнены данными по кратерам диаметром до 280 км.

Вопреки гипотезам о том, что плотная атмосфера Венеры тормозит выбросы еще в пределах кратера, приводя к «самозасыпанию» кратера, оказалось, что кратеры Венеры имеют глубину, сравнимую с глубиной земных кратеров такого же размера. Для объяснения этого явления в работе было проанализировано явление высокоскоростного удара, начиная с момента входа ударника в атмосферу. Оказалось, что высокая плотность атмосферы приводит к передаче атмосферным газам огромного количества энергии ударника на стадии его прохождения через атмосферу. В итоге к моменту удара по поверхности атмосфера не остается в исходном невозмущенном состоянии – за счет энергии торможения ударника в атмосфере происходит взрыв с мощностью, достаточной для образования над поверхностью области горячего газа с пониженной плотностью (аналог «огненного шара» ядерного взрыва). Длительность существования этой области достаточна для разлета выбросов из кратера за пределы вала, что и объясняет «нормальную» глубину кратеров [Ivanov et al., 1986, 1992].

Другим эффектом интенсивного торможения ударников в атмосфере Венеры является большая величина давления торможения на лобовой поверхности ударника. При средней скорости входа порядка 20 км/с это давление достигает у поверхности величин порядка 50 ГПа (500 кбар), что превышает предел прочности. Под действием давления торможения тело начинает деформироваться, увеличивая поперечное сечение (рис. 5). Численное моделирование процесса, про-

веденное в работе, дало возможность модифицировать модель торможения, предложенную С. С. Григоряном в 1979 г., введя сухое трение в описание внутреннего течения в разрушающемся теле.

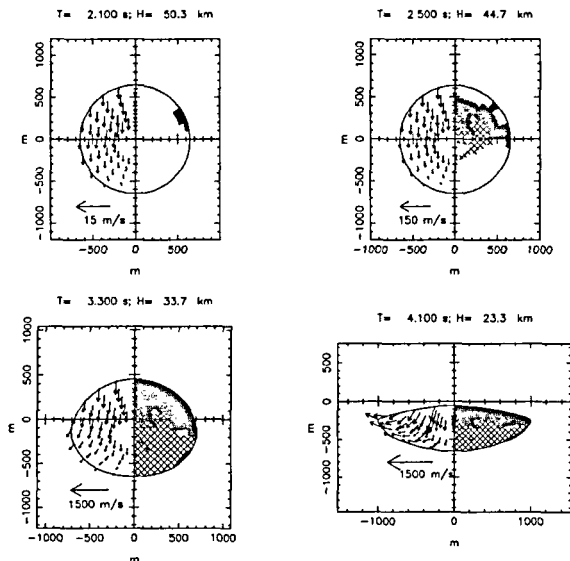


Рис. 5. Последовательность разрушения каменного метеороида при пролете через атмосферу Венеры под углом 45° . На рисунках указано время от начала торможения в секундах и высота над поверхностью в км. Линейный масштаб указан в метрах. Показано поле скоростей внутреннего течения в теле относительно нижней точки. Течение в атмосфере не показано для упрощения рисунка. В правой части каждого рисунка показана конфигурация зон разрушения в данный момент времени. Черный цвет – меридиональные трещины первичного разрушения, серый тон – разрушение отрывом, штриховка – разрушение сдвигом.

Моделирование разрушения при входе в атмосферу, проведенное в работе для случая Венеры, было применено также для анализа входа в атмосферу Юпитера фрагментов ядра кометы Шумейкера-Леви-9 и для прогноза условий кратерообразования на спутнике Сатурна Титане, также обладающей плотной атмосферой. Случай Титана был изучен в рамках подготовки к исследованию Титана КА «Кассини».

Модель разрушения метеороидов в атмосфере Венеры позволила рассчитать дефицит малых кратеров на поверхности Венеры за счет экранирующего эффекта атмосферы (рис. 6). Хорошее соответствие расчетной и наблюдаемой функций распределения кратеров по размеру подтвердило правильность интерпретации кратеров Венеры как объектов ударной природы, а также позволило провести сравнение плотности кратеров на Венере с другими планетными телами. Это позволило дать оценку среднего возраста поверхности Венеры на основе имеющихся данных о соотношении числа кратеров на единицу поверхности с

геологическим возрастом поверхности на Земле и Луне. Оказалось, что поверхность Венеры довольно однородна по своему возрасту. Здесь отсутствует значительная дихотомия типов поверхности (более древние кратерированные равнины и более молодые поверхности), наблюдаемая на Луне и Марсе. Средний возраст поверхности Венеры оценивается в 500 ± 150 млн. лет, что делает ее одной из самых молодых с типичными земными кратонами – Северо-Американским и Европейским.

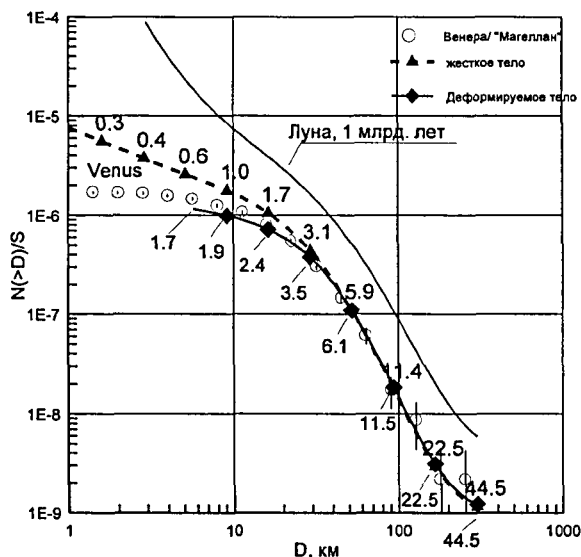


Рис. 6. Расчетное распределение кратеров Венеры по размеру в сравнении с данными, полученными по проекту “Магеллан”. Кружки – кумулятивная форма наблюдаемого на Венере распределения кратеров по размерам в сравнении с распределением кратеров на лунной поверхности возрастом 1 млрд. лет. Треугольники – модельное распределение в предположении, что ударники томятся в атмосфере Венеры как жесткие недеформированные тела. Ромбы – полная модель торможения, разрушения и деформирования метеороидов в атмосфере. Цифры у треугольников и ромбов – диаметр (в км) астероидов, образующих кратеры данного размера при падении под углом 45° .

Комплексное изучение ударных кратеров и процессов кратерообразования на Венере позволило включить эти данные в общую картину эволюции планет земного типа. Анализ закона распределения ударных кратеров по размерам был использован при сравнении распределений по размерам астероидов главного пояса и семейства ударников, образовавших кратеры на планетах земной группы (Глава 6 настоящей работы).

Глава 5 посвящена анализу растекания выбросов из ударных кратеров и методу оценки содержания летучих в коре Марса. Аномальная, по сравнению с ударными кратерами Луны и Меркурия, морфология покровов выбросов на

Марсе была впервые обнаружена на снимках высокого разрешения, переданных АМС “Викинг” (Carr et al., 1977). В плане эти выбросы имеют вид радиальных потоков, с явными следами течения по направлению от кратера. Такие выбросы получили название “флюидизированных”. Поскольку на периферии потоков зачастую наблюдаются концевые утолщения (или валы), концентрические по отношению к кратеру, другое популярное название таких структур – “кратеры-крепости” (rampart craters).

Для анализа этого процесса в работе используется зет-модель, описывающая процессы экскавации и отложения выбросов. Законы подобия позволяют здесь сделать простые оценки формы и скорости движения материала выбросов в момент окончания их баллистического разлета. Если материал выбросов ведет себя как сыпучая среда с сухим трением (что имеет место на Луне и Меркурии), движение выбросов прекращается довольно быстро после их отложения, формируя зону сплошного покрова выбросов с внешним радиусом, составляющим примерно 2-2,5 радиуса кратера. В случае «флюидизированных» выбросов наблюдается растекание на 3-6 радиусов кратера.

В данной работе исследована гипотеза о том, что причиной «флюидизации» является наличие в верхних слоях коры Марса летучих (например, воды и льда), смесь которых с обломочным материалом имеет вязко-пластические свойства. Для количественной оценки этих свойств в работе построена механическая модель вязкопластичного растекания выбросов. Специальная программа численного моделирования растекания выбросов (на основе метода МАС с добавлением возможности использования произвольной реологии материала) была использована для расчета дальности растекания потоков при различных параметрах вязко-пластической модели, за основу которой принималась модель Бингама. Удобство применения модели Бингама состоит в том, что с использованием этой модели неоднократно анализировалось движение массовых потоков различной природы на Земле (дальнопробежные лавины, лахары, грязевые и пирокластические потоки). Таким образом, оценка параметров модели Бингама для марсианских выбросов позволяет перейти к методу аналогий с известными земными процессами, что само по себе более надежно, чем использование каких-либо моделей.

В работе проведено параметрическое исследование влияния параметров модели Бингама на дальность растекания выбросов. На рис. 7 показаны линии равной дальности растекания в координатах сцепление-вязкость, полученные по вязко-пластической модели, в сравнении с опубликованными в литературе бингамовскими параметрами для земных массовых потоков различной природы.

Разница в положении изолиний дальности для кратеров диаметром 5 и 50 км (рис. 7) демонстрирует масштабный эффект повышения текучести с ростом объема выбросов при постоянстве их механических свойств. Эти результаты показывают, что марсианские выбросы со степенью растекания $R_m/R_i > 3$ обладают значительно большей текучестью, чем земные дальнопробежные лавины, и при максималы наблюдаемом растекании $R_m/R_i = 5...6$ бингамовские параметры марсианских выбросов приближаются к параметрам земных грязекаменных потоков. Этот результат подтверждает применимость гипотезы о текучести марсианских выбросов за счет экскавации богатых летучими пород.

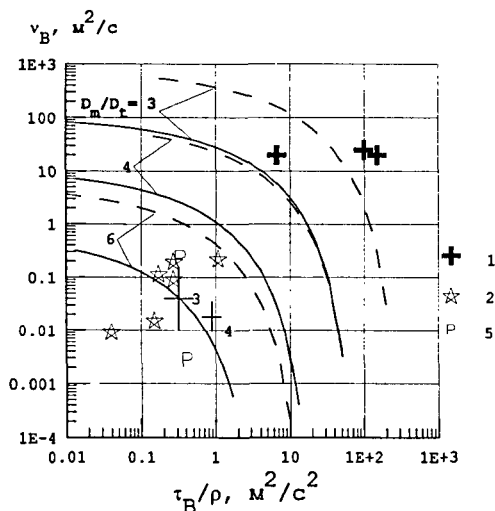


Рис. 7. Оценка бингамовских параметров - вязкости (v_B) и сцепления (в форме отношения прочности к плотности вещества τ_B/ρ) - для земных сухих, влажных и водонасыщенных обломочных потоков. 1 - каменные лавины с аномально низким трением (McEwen and Malin, 1989; Trunk et al., 1986; Потапов, 1991); 2 - водонасыщенные обломочные потоки (Whipple and Dunne, 1992; Fink et al., 1981; Pierson, 1991); P - пирокластические потоки (Beget and Limke, 1988, McEwen and Malin, 1989). Сплошные кривые - линии равного растекания R_m/R_t , равного 3, 4, и 6 для марсианских кратеров диаметром 5 км (сплошные кривые) и 50 км (пунктирные кривые).

Наиболее вероятно залегание богатых летучими пород в виде слоев, соседствующих с породами, обедненными летучими. В этом случае доля богатых летучими пород будет меняться в заданном районе Марса по мере увеличения размера кратера (т.е. с ростом глубины экскавации). В этом случае может быть использована модель выбросов как двухфазного течения смеси или суспензии каменного материала и грязи. Большое количество наблюдений, полученных в ходе текущих („Mars Global Surveyor“) и готовящихся („Mars Express“) полетов КА к Марсу позволит построить количественную модель залегания богатых летучими пород в приповерхностных слоях марсианской коры.

В заключение главы 5 разработанная для Марса модель растекания выбросов применяется к анализу Пучеж-Катунского кратера, образованного в условиях мелководного моря. Показано, что выбросы, отложенные первоначально сразу за валом кратера, даже при небольшом содержании воды могут продолжить свое движение в виде поверхностных радиальных потоков и обеспечить базальную эрозию и перенос материала на 2-4 км от места исходного залегания. Отсюда также следует, что радиальное растекание выбросов на Земле, подобное наблюдаемому на Марсе, возможно, является гораздо более типичным явлением, чем считалось ранее.

В главе 6 проводится сравнительное изучение распределения по размерам ударных кратеров и астероидов.

Последовательное применение законов подобия для ударного кратерообразования позволяет оценить распределение по размерам популяции ударников, исходя из наблюдаемой популяции лунных ударных кратеров. Для этого в работе выведены соответствующие уравнения, определены необходимые входные условия и построено решение, дающееся численным решением разностного уравнения, являющегося аналогом «точного» интегрального уравнения.

Полученное распределение ударников по размеру имеет сложную форму с волнообразными отклонениями от простого степенного закона.

Использование модельного распределения ударников по размерам позволяет воспроизвести распределение по размерам ударных кратеров на планетах земной группы. При получении модельной популяции кратеров Венеры использовались расчеты экранирующего эффекта атмосферы, описанные в главе 4. Сравнение данных для Меркурия, Венеры, Земли, Луны и Марса показывает, что большинство кратеров на всех планетах земного типа образовано одной популяцией ударников, распределение которых по размеру мало изменилась за последние 4 млрд. лет.

В области диаметров астероидов-ударников с D_p более 1 км распределение по размерам кратерообразующих тел в пределах точности данных повторяет распределение по размерам астероидов главного пояса. (рис. 8). В пределах точности имеющихся данных вклад комет в образование наблюдаемых ударных кратеров представляется незначительным, если только распределение по размерам ядер комет не повторяет распределение по размерам астероидов. Астероиды, выброшенные из главного пояса на орбиты АСЗ, представляются основным источником кратерообразующих тел на планетах земного типа.

Подобие распределений по размерам АСЗ и астероидов главного пояса при $D_p > 1$ км весьма важно для поиска механизмов пополнения числа тел, находящихся на орбитах, пересекающих орбиты планет земной группы. Дело в том, что время жизни тел на таких орбитах не превышает 10-100 млн. лет, после чего они падают на Солнце, сталкиваются с планетами или выбрасываются за пределы центральной части Солнечной системы. Следовательно, популяция этих тел должна постоянно обновляться за счет астероидов главного пояса. В последнее время среди механизмов такой подпитки обсуждается (1) попадание в резонансные области фрагментов, образующихся при столкновении астероидов и (2) хаотическая миграция параметров орбит за счет гравитационного воздействия крупных планет. Первый механизм - "прямая" доставка фрагментов столкновений в резонансные области при изменении орбиты за счет скорости разлета, приобретенной фрагментом в ударном событии [Zappala et al., 1998], может зависеть от размера фрагмента. Общим правилом ударных процессов является зависимость скорости разлета от размера фрагмента: меньшие фрагменты в среднем имеют большую скорость разлета. Следовательно, меньшие фрагменты с большей вероятностью попадают в резонансные области. Ввиду этого при "прямой доставке" популяция АСЗ должна быть обогащена малыми телами и, следовательно, иметь более крутое распределение по размерам [Rabinowitz et al., 1994].

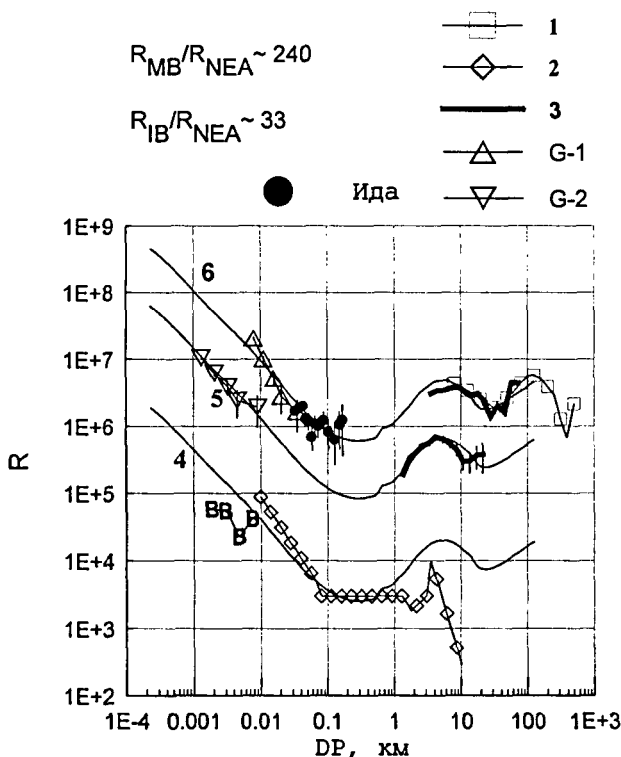


Рис. 8. Распределение по размерам астероидов главного пояса в сравнении с распределением АСЗ, оцениваемого по распределению ударных кратеров. 1 - наблюдаемые астероиды [Davis et al., 1989], 2 - наблюдаемые АСЗ [Rabinowitz et al., 1994]; 3 - новейшие наблюдения главного пояса [Jedicke and Metcalfe, 1998]; 4 - оценка распределения АСЗ по ударным кратерам (данная работа); 5 и 6 - кривая 4, сдвинутая вверх для аппроксимации наблюдательных данных для внутреннего пояса астероидов (5) и главного пояса астероидов в целом; В - оценки по спутниковым наблюдениям крупных болидов в земной атмосфере [Nemchinov et al., 1997]; G1 и G2 - оценки для главного пояса по кратерам на поверхности астероида Гаспра [Chapman et al., 1996] в предположении прочностного (G1) и гравитационного (G2) режима образования кратеров. Оценки для астероида Ида сделаны в предположении гравитационного образования кратеров.

Второй механизм - хаотическая миграция тел - обуславливается возмущениями со стороны больших планет и не зависит от размера астероидов и их фрагментов.

Подобие распределений по размерам АСЗ и астероидов главного пояса указывает на хаотическую миграцию тел в главном поясе как на главный механизм

попадания астероидов и их обломков на орбиты, пересекающие орбиту Марса и/или в резонансные фазовые области, где они достаточно быстро переводятся на орбиты АСЗ. Возможно, эти механизмы действуют вместе и «прямая доставка» ответственна за расхождение распределений для АСЗ и модельного распределения для главного пояса, показанное на рис. 8. Во всяком случае, гипотеза о превалировании хаотической миграции представляется справедливой для тел размером более 1 км.

Из гипотезы о превалировании хаотической миграции следует, что плотность потока кратерообразующих АСЗ с диаметром более 1 км должна быть пропорциональна числу тел соответствующих размеров в главном поясе. Модель столкновительной эволюции главного пояса приводит к примерно трехкратному уменьшению количества тел за 3.5 млрд. лет. Следовательно, скорость кратерообразования на планетах земной группы должна была измениться не более чем в три раза за это же время. Этот вывод примерно соответствует заключению, давно сделанному планетологами - за последние 3 млрд. лет скорость кратерообразования была постоянной с точностью до множителя 2.

Естественным объяснением волнообразного отклонения закона распределения астероидов по размерам согласно недавним новым данным является переход от прочностного к гравитационному режиму катастрофических столкновений в ходе ударной эволюции пояса астероидов. Универсальность этого механизма (в основе которого лежит закон всемирного тяготения) дает естественное объяснение постоянства формы кривых, отражающих распределение по размерам ударных кратеров и астероидов, их образовавших.

Таким образом, общая картина кратерообразования на планетах Солнечной системы начинает выглядеть более однородной и самосогласованной. Вопросы о роли комет в образовании ударных кратеров и о возможном различии распределения по размерам малых ($D_p < 1$ км) АСЗ и астероидов главного пояса требуют дополнительного изучения.

Заключение.

Основные результаты работы могут быть изложены в следующем кратком виде:

1. Предложена схематизация движения среды при ударном кратерообразовании (зет-модель), создающая удобный аналитический аппарат для анализа экспериментальных данных.
2. Построена система законов подобию главных параметров ударного процесса для широкого диапазона масштабов явления.
3. Предложена и апробирована модель динамического снижения сухого трения в породах, окружающих растущий кратер, за счет относительного колебания блоков пород, составляющих зону разрушения. С использованием данной модели путем численного моделирования впервые воспроизведены закономерности усложнения морфологии ударных кратеров по мере роста их размера на данной планете.
4. Проведено численное решение ряда конкретных задач. В частности, построена модель начальной стадии ударного образования кратера Чиксулуб, и впервые получены оценки массы серы, выделяемой в атмосферу за счет ударной дегазации ангидрида, входящего в состав осадочного чехла в районе образования этой структуры. Построена модель образования Пучеж-

- Катунского метеоритного кратера; на ее основе проведен анализ геолого-геофизических данных, полученных при бурении Воротиловской сверхглубокой скважины; доказана ударная природа Пучеж-Катунского кратера.
5. Выявлено блочное строение массива Воротиловского выступа, представляющего собой центральное поднятие Пучеж-Катунского кратера. Показано, что при значительной амплитуде перемещения пород центрального поднятия (порядка 4-8 км по вертикали), деформирование массива происходит в виде системы блоков со средним размером порядка 100 м.
 6. Результаты, полученные при изучении кратеров Земли и Луны, использованы для обнаружения, распознавания и анализа строения ударных кратеров Венеры. Выявлены главные особенности процесса кратерообразования на Венере. Впервые измерены глубины венерианских ударных кратеров. Показано, что вопреки предсказаниям, ударные кратеры Венеры имеют глубину, близкую к глубине кратеров Земли: плотная атмосфера не приводит к «самозасыпанию» кратеров выбросами, заторможенными в плотной атмосфере. Показано, что данное явление обусловлено большими размерами и достаточно длительным временем существования области горячего малоплотного газа (аналога «огненного шара») над образующимся кратером. Эта область возникает за счет энергии, переданной в атмосферу при подлете ударника к поверхности планеты. Построенная модель разрушения астероидов количественно воспроизводит наблюдаемое влияние экранирующего влияния атмосферы Венеры на распределение по размерам ударных кратеров.
 7. Проанализирована гипотеза о природе "кратеров-крепостей", обнаруженных на Марсе. Построена модель формирования разлета выбросов и их последующего радиального растекания после падения на поверхность. Получены оценки свойств текучего материала. Путем сравнения по этим параметрам с земными потоками различной природы (лавины, грязе-каменные и пирокластические потоки) показана приемлемость гипотезы о том, что текучесть марсианских выбросов обусловлена наличием летучих (в основном, воды и льда) в приповерхностных слоях коры Марса. Это позволяет предложить новые методы оценки содержания летучих на Марсе.
 8. По наблюдаемому на Луне распределению ударных кратеров по размерам с использованием предложенных в работе законов подобия построено распределение по размерам ударников, т.е. малых тел, образовавших эти кратеры. С использованием тех же законов подобия построены модельные распределения по размерам ударных кратеров на Меркурии, Венере, Земле и Марсе. Близкое соответствие результатов модельного подсчета и реально наблюдаемых популяций кратеров на планетах земного типа свидетельствует о том, что в последние ~ 4 млрд. лет планеты бомбардировались одним и тем же семейством ударников, распределенных по размерам с характерным волнообразным отклонением от простого степенного закона.
 9. Проведено сравнение распределения по размерам тел, образовавших кратеры на планетах земной группы и астероидов главного пояса. Показано, что в пределах точности имеющихся данных эти распределения совпадают. Это свидетельствует о том, что механизм пополнения популяции тел на орбитах, пересекающих орбиты планет, действует независимо от размера астероидов и их фрагментов, возникающих в ходе столкновительной эволюции. Следовательно, открытые в последнее время эффекты хаотической миграции тел главного пояса на орбиты, пересекающие орбиту Марса, по-видимому пре-

валируют над механизмами «прямой доставки» фрагментов столкновений в фазовые области действия резонансов.

В общей форме результаты исследований по теме диссертационной работы могут быть сформулированы следующим образом:

В работе предложен новый подход к проблеме сравнительного изучения ударных кратеров и процессов их образования на планетных телах земного типа. В результате проведенных исследований разработан системный подход к изучению ударных событий и предложен набор законов подобия, позволяющих сравнивать ударные события различного масштаба на различных планетах. Разработанный подход включает методы экспериментального, геолого-геофизического и теоретического изучения ударных кратеров и процессов их образования. Изучение кратерообразования на различных планетах земного типа позволило получить новые данные об особенностях эволюции планет, их спутников и астероидов. Это - новое направление в исследовании природных динамических процессов на твердых планетных телах Солнечной системы.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Книги и главы в книгах:

1. *Ударные кратеры на Луне и планетах* (1983). Базилевский А. Т., Иванов Б. А., Флоренский К. П. и др., М.: Наука, 200 с.
2. **Иванов Б.А.** (1989) Ударные кратеры. Раздел III.6 в книге "*Венера*" (под ред. В.Л.Барсукова и В.П.Волкова). Москва, "Наука".
3. Neukum G., and **B.A.Ivanov** (1994) Crater size distribution and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial-planet, and asteroid cratering data. In: *Hazards due to Comets and Asteroids*, (T. Gehrels, Ed.) Univ. Arizona Press pp.359-416.
4. McKinnon, W. B., Zahnle, K. J., **Ivanov, B., A.**, and Melosh H. J. (1997) Cratering on Venus: Models and observations. In *Venus II* (S. W. Bougher, D. M. Hunten, and R. J. Phillips, eds.), Univ. Arizona Press, Tucson, Arizona, pp.969-1014.
5. M.V. Gerasimov, **B.A. Ivanov**, O.I. Yakovlev, and Yu.P. Dikov (1998) Physics and chemistry of impacts In: *Laboratory Astrophysics and Space Research*, (P. Ehrenfreund, C. Krafft, H. Kochan, and V. Pirronello, eds.) Kluwer Academic Publishers:, Astrophysics and Space Science Library (ASSL), pp. 279-340.

Статьи в рецензируемых периодических изданиях

6. **Иванов Б.А.** (1977) О механическом эффекте взрыва вблизи поверхности грунта. Физика горения и взрыва, № 1, 110-113.
7. Базилевский А.Т., **Иванов Б.А.** (1977) Обзор достижений механики кратерообразования. В сб. Механика образования воронок при ударе и взрыве. М.: Мир, с. 172-227.

8. Дабижа А.И., Иванов Б.А. (1978) Геофизическая модель строения метеоритных кратеров и некоторые вопросы механики кратерообразования, Метеоритика, вып. 37, 160-167.
9. Иванов Б.А. (1979) Простая модель кратерообразования. Метеоритика № 38, М., "Наука", 68-85.
10. Иванов Б.А. (1979) Некоторые вопросы механики образования ударных и взрывных кратеров, в сб.: Метеоритные структуры на поверхности Земли, М.: Наука, с. 31-45.
11. Иванов Б.А. (1981) Механика кратерообразования. В сб.: Итоги науки и техники ВИНТИ. Сер. Механика деформируемого твердого тела, т. 14, с. 60-128, см., также, перевод на английский: NASA Tech. Memorandum 88477/N87-15662, 1986.
12. Иванов Б.А. (1981) Успехи механики кратерообразования, в сб.: Удар, взрыв, разрушение, М.: Мир, с. 204-238.
13. Иванов Б.А., Базилевский А.Т., Сазонова Л.В. (1982) Об образовании центрального поднятия в метеоритных кратерах. Метеоритика 40, 67-81. Пер. на англ. Technical Translation NASA TM-88427, 1986.
14. Иванов Б.А., Базилевский А.Т. (1985) Метеоритные кратеры, Природа №10, 23-35.
15. Иванов Б.А. (1994) Геологическое и геохимическое воздействие метеоритных ударов: кратер Чиксулуб. В сб.: Динамические процессы в геосферах: геофизика сильных возмущений. Наука, Москва, 1994, 150-156.
16. Иванов Б. А. (1996) Растекание выбросов из ударных кратеров и возможность оценки содержания летучих в коре Марса. Астрономический Вестник, т. 30(1), 43-58.
17. Ivanov B.A. (1976). The effect of gravity on crater formation: thickness of ejecta and concentric basins, in Proc. Lunar Sci. Conf 7th, pp. 2947-2965.
18. A.T.Basilevsky, L.B.Ronca and B.A.Ivanov (1980). On the rate of ancient meteoroidal flux: studies of the pre-mare crater population on the Moon, The Moon and the Planets, 23, 3565-371.
19. L.B.Ronca, A.T. Basilevsky, V.P.Kryuchkov and B.A.Ivanov (1981). Lunar craters evolution and meteoroidal flux in pre-mare and post-mare times, The Moon and the Planets, 245, 209-229.
20. Ivanov B.A., Basilevsky A.T., Kryuchkov V.P., and Chernaya I.M. (1986) Impact craters on Venus: Analysis of Venera 15 and 16 data, Proc 16th Lunar Planet Sci. Conf., J. Geophys. Res. 91, B4, D413- D430.
21. Basilevsky A.T., Ivanov B.A., Burba G.A., Chernaya I.M., Kryuchkov V.P., Nikolaeva O.V., Campbell D.B., and Ronca L.B. (1987) Impact craters on Venus: A continuation of the analysis of data from the Venera 15 and 16 spacecraft, J. Geophys. Res. 92, 12,869-12,901.
22. Ivanov B.A., and Basilevsky A.T. (1987) A comparison of crater retention ages on the Earth and Venus, Solar System Research 21, 84-89.
23. Basilevsky A.T., and Ivanov B.A. (1990) Cleopatra crater on Venus: Venera 15/16 data and impact/volcanic origin controversy, Geophys. Res. Lett. 17, No. 2, 175-178.
24. Ivanov B.A. (1990) Venusian impact craters on Magellan images: View from Venera 15/16, Earth, Moon and Planets 50/51, 159-173.

25. **Ivanov B.A.** (1991) Impact cratering processes, *Advances in Space Research* (Proc. XXVIII COSPAR Meeting, The Hague, 1990), V.11, No.6, pp. (6)67-(6)75.
26. **Ivanov B.A.**, I.V.Nemchinov, V.A.Svetsov, A.A.Provalov, V.M.Khazins, and R.J.Phillips (1992) Impact cratering on Venus: Physical and mechanical models, *J. Geophys. Res.*, V. 97, N E10, 16,167-16,181.
27. **Ivanov B.A.** (1994) Geomechanical models of impact cratering: Puchezh-Katunki structure. In: *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution* (B.O.Dressler, R.A.F.Grieve, and V.L.Sharpton, eds.), *Geol. Amer. Spec. Pap.* 293, pp. 81-91.
28. GRYAZNOV, V. K.; IVANOV, B. A.; IVLEV, A. B.; KLUMOV, B. A.; UTUZHNIKOV, S. V.; FORTOV, V. E. (1994) Collision of the comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter: Interpretation of observed data. *Earth, Moon, and Planets*, vol. 66, no. 1, p. 99-128.
29. **B.A.Ivanov**, D.D.Badukov, O.I. Yakovlev, M.V. Gerasimov, Yu.P. Dikov, K.O.Pope, and A.C. Ocampo (1996). Degassing of sedimentary rocks due to Chicxulub impact:hydrocode and physical simulations. *Geol. Soc. Spec. Pap.* 307, 125-139.
30. **B.A. Ivanov**, D. DeNiem, and G.Neukum (1997) Implementation of dynamic strength models into 2D hydrocodes: applications for atmospheric breakup and impact cratering. *International Journal of Impact Engineering*, v. 20, p. 411-430.
31. **B.A.Ivanov**, A.T.Basilevsky, and G. Neukum (1997) Atmospheric entry of large meteoroids: Implication to Titan. *Planet. Space Sci.*, 45(8): 993-1007.
32. Pope K., Baines, K., Ocampo, A., and **Ivanov B. A.** (1997) Energy, volatile production, and climatic effects of the Chicxulub - Cretaceous/Tertiary impact. *Journal of Geophysical Research*, 102(9): 21645-21664.
33. **B. A. Ivanov** (1998) Large impact crater formation: Thermal softening and acoustic fluidization. *Meteoritics and Planetary Science*, 33(Suppl.): A76.
34. Melosh H. J., and **B. A. Ivanov** (1999) Impact crater collapse. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 27:385-415.
35. **B. A. Ivanov**, and A. Deutsch (1999) Sudbury impact event: Cratering mechanics and thermal history. *Spec. Pap. Geol. Soc. Amer.* 307, in press.

Расширенные тезисы докладов на главных международных конференциях:

36. **Ivanov B.A.**, and Comissarova L.I. (1977) The simple hydrodynamic model of cratering, *Lunar Science VIII*, p. 499-501.
37. **Basilevsky A.T.**, **Granovsky L.B.**, and **Ivanov B.A.** (1978) Grain size distribution and relative length of fragments in allogene breccias of meteoritic craters, *LPSC IX*, 47-49.
38. **Ivanov B.A.**, **Basilevsky A.T.**, (1979) On the problem of central mounds/peaks formation in impact craters, *LPSC X*, p. 607-609.
39. **Basilevsky A.T.**, **Ronca L.B.**, and **Ivanov B.A.**, (1980) On the rate of ancient meteoroidal flux: Studies of pre-mare population on the moon, *LPSC XI*, 55-57.
40. **Ivanov B.A.**, **Korotkov P.F.**, **Sudakov D.A.** (1981) Temperature and density in a cloud of material vaporized by meteorite impact, *LPSC XII*, p. 497-499.
41. **Ronca L.B.**, **Basilevsky A.T.**, **Kryuchkov V.P.**, and **B.A.Ivanov** (1981) Equilibrium conditions in a terra and a mare region, *LPSC XII*, 903-905.
42. **Basilevsky A.T.**, and **Ivanov B.A.** (1982) Impact cratering on stony and icy bodies: Different mechanisms of central peak formation?, *LPSC XIII*, 27-28.

43. Ivanov B.A. (1983) The model of cratering in the ideal-plastic media, LPSC XIV, 343-344.
44. Ivanov B.A., and Basilevsky A.T. (1983) On the fragment-size distribution of ejecta of impact craters, LPSC XIV, 345-346.
45. Feldman V.I., Sazonova L.V., Mironov Yu.I., Kapustkina I.G., and Ivanov B.A. (1983) Circular structure Logancha as possible meteorite crater in basalts of the Tunguska syncline, LPSC XIV, 191-192.
46. Ivanov B.A. (1988) Effect of modification of impact craters on the size-frequency distribution and scaling law, LPSC XIX, 531-532.
47. Ivanov B.A. (1988) On the breakup diameter of meteoroids in the Venusian atmosphere, LPSC XIX, 533-534.
48. Ivanov B.A. (1988) Simple hydrodynamic model of atmospheric breakup of hypervelocity projectiles, LPSC XIX, 535-536.
49. Ivanov B.A. (1989) Z-model with shear bulking and gravity anomalies above impact craters, LPSC XX, 446-447.
50. Ivanov B.A. (1991) Hydrodynamic model of central mound formation at meteorite craters, LPSC XXII, 617-618.
51. Ivanov B.A. (1991) Mechanical consequences of impact formed crater Stickney on Phobos, LPSC XXII, 619-620.
52. Ivanov B.A., Nemchinov I.V., V.A.Provalov, V.V.Svetsov, and V.M.Khasins (1991) Impact cratering on Venus: Physical and mechanical models, LPSC XXII, 621-622.
53. Petaev M.I., Kisarev Yu.L., Mustafin Sh.A., Shakurov R.K., Pavlov A.V., and Ivanov B.A. (1991) Meteorite Sterlitamak - A new craterforming fall, LPSC XXII, 1059-1060.
54. Potapov A.V., and Ivanov B.A. (1991) Landslide motion: Numerical simulation for Earth and Mars, LPSC XXII, 1087-1088.
55. Ivanov B.A. and Petaev M.I. (1992) Mass and velocity of the meteorite formed the Sterlitamak crater in 1990, LPSC XXIII, 573-574.
56. Ivanov B.A., A.A.Provalov, and V.A.Rybakov (1992) The possible radiative heat damage of the Venusian surface, LPSC XXIII, 575-576.
57. Provalov A.A., and B.A.Ivanov (1992) Near surface soil-gas flow due to impact on Venus, LPSC XXIII, 1115-1116.
58. Pevzner L.A., Kirjakov A.F., Vorontsov A.K., Masaitis V.L., Mashchak V.S., and Ivanov B.A. (1992) Vorotilovskaya drillhole: First deep drilling in the central uplift of large terrestrial impact crater. LPSC XXIII, 1992, 1063-1064
59. Ivanov B.A., and P.G.Ford (1993) The depth of the largest impact craters on Venus. LPSC XXIV, 689-690.
60. Pope K.O., A.C.Ocampo, K.H.Bains, and B.A.Ivanov (1993) Global blackout following the K/T Chicxulub impact: Results of impact and atmospheric modeling. LPSC XXIV, 1165-1166.
61. Provalov A.A., and Ivanov B.A. (1993) Impact disturbance of the Venus atmosphere. LPSC XXIV, 1187-1188.
62. Ivanov B.A., and Melosh H.J. (1994) Dynamic fragmentation of a comet in the Jovian Atmosphere. LPSC XXV, 597-598.
63. Ivanov B.A., B.C.Murray, and A.Yen (1994) Dynamical model of fluidized ejecta blankets on Mars. LPSC XXV.
64. Ivanov B.A., G.G.Kocharian, and V.N.Kostuchenko (1995) Geomechanical models of impact crater formation. European Geophysical Society, XX General As-

- sembly, Hamburg, 3-7 April 1995 Abstracts, *Annales Geophysicae*, Suppl. III to Volume 13, p. C739.
64. G.Neukum, K.Junghans, and B.A.Ivanov (1995) Model recalculation of the lunar standards crater curve to Mars and other planets. European Geophysical Society, XX General Assembly, Hamburg, 3-7 April 1995 Abstracts, *Annales Geophysicae*, Suppl. III to Volume 13, p. C749.
 66. B.A.Ivanov, and G.Neukum (1995) Application of the standard crater-size distribution to Mars and the Earth: Questions and answers. European Geophysical Society, XX General Assembly, Hamburg, 3-7 April 1995 Abstracts, *Annales Geophysicae*, Suppl. III to Volume 13, p. C760.
 67. IVANOV, B. A.; KOCHARYAN, G. G.; KOSTUCHENKO, V. N.; KIRJAKOV, A. F.; PEVZNER, L. A. (1995) Puchezh-Katunki Impact Crater: Preliminary Data on Recovered Core Block Structure. *Meteoritics*, vol. 30, no. 5, page 524.
 68. B.A.Ivanov, G.G.Kocharyan, V.N.Kostuchenko, A.F.Kirjakov, and L.A.Pevzner (1996) PUCHEZH-KATUNKI IMPACT CRATER: PRELIMINARY DATA ON RECOVERED CORE BLOCK STRUCTURE; *LPSC XXVII*, 589-590.
 69. B.A.Ivanov and A.V.Pogoretzky (1996) Bingham parameters for fluidized ejecta spreading on Mars and Martian volatiles, *LPSC XXVII*, 587-588.
 70. BAINES, K. H.; POPE, K. O.; OCAMPO, A. C.; IVANOV, B. A. (1996) Long-term Environmental Effects of the Chicxulub Impact. *Lunar and Planetary Science*, volume 27, page 55.
 71. NEUKUM, G.; IVANOV, B. A. (1996) The Size-Frequency Distribution of Impact Craters in the Inner Solar System and Implications for Past and Recent Cratering Rates in the Earth-Moon System *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 31, page A97
 72. B.A.Ivanov, G.G.Kocharyan, V.N.Kostuchenko, and D. DeNiem (1996) MECHANICAL PROPERTIES OF PLANETARY SURFACES: IMPLICATIONS FROM IMPACT CRATER MORPHOLOGY, *EGS-1996*, The Hague, Netherlands.
 73. B.A.Ivanov, A.V.Pogoretzky, and R.Pischel (1996) INVENTORY OF VOLATILES ON MARS: EVIDENCES FROM FLUIDIZED EJECTA BLANKETS AROUND IMPACT CRATERS, *EGS-1996*, The Hague, Netherlands
 74. B.A.Ivanov, K.Junghans and G.Neukum (1996) DISCREPANCY OF LUNAR AND TERRESTRIAL RECENT CRATERING RATES: POSSIBLE RECONCILIATION, *EGS-1996*, The Hague, Netherlands
 75. Ivanov B. A., Pogoretzky A. V., and Murray B. (1997) Fluidized Ejecta Blankets on Mars: Estimate of Material Properties. *Lunar and Planetary Science Conference 28th*. 637-638
 76. B. A. Ivanov, and V. N. Kostuchenko (1997) Block oscillation model for impact crater collapse *Lunar and Planetary Science Conference 28th*, #1655.
 77. B.A.Ivanov, G. Neukum, and D. DeNiem (1998) Cometary impact rates on Jovian satellites: questions. *Lunar and Planetary Science Conference 28th*, #1769.
 78. Ivanov B. A., and Kostuchenko V. N. (1998) Impact crater formation: Dry friction and Fluidization Influence on the Scaling and Modification. *Lunar Planetary Science Conference 29th*, abstract #1654.
 79. Kenkmann, T. and Ivanov, B. A. (1999) Low-Angle Faulting in the Basement of Complex Impact Craters: Numerical Modelling and Field Observations in the Rochechouart Structure, France, *Lunar and Planetary Science Conference 30*, CD_ROM edition, # 1544.

80. Ivanov, B. A. (1999) Transient Crater Modification Due to Gravity Slumping. Lunar and Planetary Science Conference, 30, CD-ROM edition, #1574.
81. Ivanov, B. A. , Neukum, G. and Wagner, R. (1999) Impact Craters, NEA, and Main Belt Asteroids: Size-Frequency Distribution. Lunar and Planetary Science Conference, 30, CD-ROM edition, abstract #1583.