

Академия наук СССР
Сибирское отделение
Вычислительный центр

О Т Ч Е Т по НИР
Оценки частоты падения небесных тел на Землю, исследование
возможности заблаговременного их обнаружения и изменения
траекторий.
шифр - ПАТРУЛЬ

Книга 1 I
ИМПАКТНЫЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМЛИ: БАНК ДАННЫХ, ОБЩИЕ ЗАКО-
НОМЕРНОСТИ, НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ, ВОПРОСЫ ДИАГНОС-
ТИКИ И МЕТОДИКИ ПОИСКА.

Научный руководитель НИР "Патруль"
Директор ВЦ СОАН СССР
академик

А.С.Алексеев

"__" _____ 1991 г.

Ответственный исполнитель НИР "Патруль"
СНС ВЦ СО АН СССР

В.Е.Петренко

"__" _____ 1991 г.

Новосибирск 1991

Исполнители

МНС ВЦ СОАН СССР

Разделы: I.3, I.4, I.7

З.А.Ляпидевская

СНС ВЦ СОАН СССР

**Введение, Заключение,
разделы: I.1, I.2, I.5, I.6, 2-5.**

В.Е.Петренко

РЕЗЮМЕ

В отчете описан банк данных (БД) для 125 достоверных и 110 предполагаемых импактных структур Земли, разработанный на персональном компьютере IBM PC/AT и предназначенный для использования в информационных и научно-исследовательских целях. Показаны некоторые его возможности для автоматической обработки данных об импактных структурах. Указаны возможные направления работ по расширению БД. Дан обзор существующих каталогов импактных структур Земли.

Рассмотрены вопросы классификации импактных структур и некоторые общие закономерности, характерные для них, несмотря на значительные различия структур по размерам, геологическому возрасту, особенностям внутреннего строения и составу залегающих в них пород. Приведены соотношения между некоторыми параметрами кратеров, оценки объемов горных пород, подвергшихся различным преобразованиям при ударе метеорита, рассмотрены закономерности пространственного расположения внутренних кольцевых поднятий в многокольцевых структурах.

Обсуждаются проблемы парных кратеров Земли, обнаружения кратеров в океане, разработки надежной и экономичной методики идентификации импактных кратеров, необходимой для выделения космогенных кольцевых структур среди большого числа кольцевых структур Земли.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК КАТАЛОГОВ.....	6
СПИСОК ТАБЛИЦ.....	6
СПИСОК РИСУНКОВ.....	8
ВВЕДЕНИЕ.....	9
I. БАНК ДАННЫХ И НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЛЯ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ.....	19
I.1. О КЛАССИФИКАЦИИ УДАРНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ ПО СТЕПЕНИ ДОСТОВЕРНОСТИ ИХ КОСМОГЕННОЙ ПРИРОДЫ.....	20
I.2. ОБЗОР КАТАЛОГОВ УДАРНЫХ КРАТЕРОВ ЗЕМЛИ.....	23
I.3. ОПИСАНИЕ БАНКА ДАННЫХ ДЛЯ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ.....	30
I.4. ПОЯСНЕНИЯ К КАТАЛОГУ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ.....	36
I.5. КРАТКИЙ ОБЗОР КАТАЛОГА ДОСТОВЕРНЫХ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ И АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ.....	39
I.5.1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРАТЕРОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ.....	39
I.5.2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРАТЕРОВ ПО РАЗМЕРАМ.....	41
I.5.3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРАТЕРОВ ПО ВОЗРАСТУ.....	44
I.5.4. СВЯЗЬ МЕЖДУ РАЗМЕРАМИ И ВОЗРАСТОМ КРАТЕРОВ.....	45
I.5.5. УРОВЕНЬ СОХРАННОСТИ КРАТЕРОВ.....	46
I.5.6. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИМПАКТНЫХ КРАТЕРОВ.....	50
I.5.7. О ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ ИМПАКТНЫХ КРАТЕРОВ.....	55
I.5.8. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР.....	55
I.5.8.1. ГРАВИТАЦИОННЫЕ АНОМАЛИИ.....	56
I.5.8.2. МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ.....	66
I.5.8.3. СЕЙСМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТЕОРИТНЫХ КРАТЕРОВ.....	67
I.5.8.4. ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА.....	69
I.5.9. ГЕОЛОГО - ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ.....	69
I.5.10. ОСТАТКИ МЕТЕОРИТНОГО ВЕЩЕСТВА.....	70
I.5.11. КОНУСЫ РАЗРУШЕНИЯ.....	73
I.5.12. ПРИЗНАКИ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	75
I.5.13. ВЗРЫВНЫЕ БРЕКЧИИ И ИМПАКТИТЫ.....	77

1.6. О КРАТЕРНЫХ ПОЛЯХ И ПАРНЫХ КРАТЕРАХ ЗЕМЛИ.....	82
1.7. КРАТКИЙ ОБЗОР КАТАЛОГА ПРЕДПОЛАГАЕМЫХ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ.....	84
2. О ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ДЛЯ СЛОЖНЫХ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ.....	89
3. ОЦЕНКИ ОБЪЕМОВ ПОРОД, ПОДВЕРГШИХСЯ ПЕРЕРАБОТКЕ ПРИ УДАРЕ МЕТЕОРИТА.....	94
3.1. ПАРАМЕТРЫ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ МЕТЕОРИТНОМ УДАРЕ.....	94
3.2. СВЯЗЬ ЭНЕРГИИ УДАРА И РАЗМЕРОВ КРАТЕРА.....	97
3.3. ОЦЕНКИ ОБЪЕМОВ ИСПАРЕННОГО И РАСПЛАВЛЕННОГО ВЕ- ЩЕСТВА МИШЕНИ.....	98
3.4. ОЦЕНКИ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ КРАТЕРООБРА- ЗОВАНИИ.....	103
3.5. РАЗУПЛОТНЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД.....	105
4. ПОДВОДНЫЕ КРАТЕРЫ.....	108
5. О МЕТОДОЛОГИИ ПОИСКА И О ДИАГНОСТИКЕ КОСМОГЕННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ.....	111
5.1. ПОИСК И ДИАГНОСТИКА ИМПАКТНЫХ КРАТЕРОВ НА СУШЕ.....	111
5.2. К ПОИСКУ ПОДВОДНЫХ ИМПАКТНЫХ КРАТЕРОВ.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	123
ЛИТЕРАТУРА.....	126

СПИСОК КАТАЛОГОВ

Каталог достоверных импактных структур Земли, вар.1.	34
Каталог достоверных импактных структур Земли, вар.2.	35
Каталог предполагаемых импактных структур Земли.	87

СПИСОК ТАБЛИЦ

I.1.	Распределение кратеров на поверхности Земли.	39
I.2.	Распределение кратеров по диаметру.	41
I.3.	Сравнение диаметров некоторых структур в каталогах [9] и [14].	42
I.4.	Распределение числа кратеров по возрасту.	44
I.5.	Распределение импактных структур по степени эрозии.	47
I.6.	Простые импактные структуры.	52
I.7.	Импактные структуры с центральным поднятием.	53
I.8.	Сложные импактные структуры.	54
I.9.	Имеющиеся данные о гравитационных аномалиях импактных структур.	59
I.10.	Геофизические характеристики некоторых импактных кратеров Земли.	60
I.11.	Количественные параметры метеоритных структур.	64
I.12.	Имеющиеся данные о магнитных аномалиях импактных структур.	66
I.13.	Импактные структуры с присутствием метеоритного вещества.	71
I.14.	Распределение импактных структур по виду метеоритного вещества.	72
I.15.	Признаки ударного метаморфизма в импактных структурах.	79
2.1.	Горизонтальные размеры 33 сложных импактных кратеров Земли.	90
2.2.	Диаметры колец для сложных импактных структур, имеющих ≥ 3 колец и для неимеющих внутренних колец.	93

3.1.	Значения параметров уравнения состояния Тиллотсона.	94
3.2.	Уровни давления и плотности внутренней энергии, необходимые для плавления и испарения веществ после разгрузки.	98
3.3.	Возможные фазовые переходы в веществе метеорита и мишени после разгрузки при ударе с различными скоростями.	99
3.4.	Объемы расплавленных пород в некоторых кратерах Земли.	101

СПИСОК РИСУНКОВ

I.1.	Достоверные импактные структуры Земли.....	40
I.2.	Интегральное $K(D)$ и дифференциальное $N(D)$ распределения кратеров по размерам D	43
I.3.	Распределение метеоритных кратеров по возрасту T и размерам D	45
1.4.	Уровень сохранности структур в зависимости от индекса сохранности.....	48
1.5.	Интегральное распределение числа метеоритных кратеров по приведенному возрасту T / S	49
I.6.	Зависимость амплитуды аномалии силы тяжести от размеров структуры.....	57
I.7.	Изменение амплитуды аномалии с пересчетом на высоту.....	61
I.8.	Зависимость параметров метеоритных кратеров от их размеров.....	62
I.9.	Геофизическое распределение импактных структур Земли с обнаруженными конусами разрушения.....	74
I.10.	Предполагаемые импактные структуры Земли.....	85
I.11.	Относительные размеры предполагаемых импактных структур Земли.....	86
I.12.	Распределение предполагаемых метеоритных кратеров по возрасту T и размерам D	88
3.1.	Зависимость начального давления p_0 от скорости соударения V_1	96
3.2.	Зависимость амплитуды отрицательной аномалии $-Δg$ земных метеоритных кратеров от диаметра кратера D . I07	
4.1.	Тектонические структуры моря Росса (план).....	I09

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последнего миллиарда лет астероиды и кометы тысячи раз сталкивались с Землей, заставляя испаряться и плавиться тонны горных пород и создавая кратеры в десятки и даже сотни километров. Каждое такое событие длилось лишь несколько секунд, но его последствия прослеживались на протяжении всей геологической и биологической истории.

Хотя кажется невероятным, что земная поверхность может скрывать следы таких катастрофических событий, геологам приходится вести тщательные поиски остатков импактных кратеров. Большинство из таких кратеров давным-давно исчезли с поверхности Земли. Процессы эрозии, отложения осадков, выбросы лавы и перемещение континентов сглаживают кратеры. Многие сохранившиеся импактные кратеры недоступны для наблюдения, поскольку они скрыты толщей океанской воды. Однако в процессе изучения известных земных импактных кратеров исследователи разработали методы их идентификации, поняли процесс их образования и научились определять размеры создавших их небесных тел.

Возраст импактных кратеров на Земле различен — от нескольких лет до почти двух миллиардов лет. Большинство импактных кратеров имеют возраст менее 200 млн. лет, хотя на основе данных по Луне предполагают, что на протяжении последних трех млрд. лет скорость кратерообразования оставалась примерно постоянной. Старые кратеры встречаются не столь часто просто потому, что они разрушены в результате эрозии и других геологических процессов. Скорости разрушения кратеров неодинаковы для различных регионов Земли и это отражается на географическом распределении кратеров. Примерно две трети из них располагаются в устойчивых внутренних областях континентов, где низки скорости эрозии и другие процессы разрушения. Интенсивность поиска и исследований импактных кратеров также отражается на их географическом распределении, например, в Северной Америке, Европе и Австралии было найдено больше кратеров,

чем в Южной Америке, Африке или Азии, где поиски проводились менее интенсивно.

Значительные успехи в изучении космогенных структур (метеоритных кратеров и астроблем) были достигнуты за рубежом, в особенности в Канаде, и в СССР, где были выявлены крупные космогенные структуры в Казахстане, на Украинском и Алданском щитах и на Сибирской платформе. Астроблемами называют космогенные структуры, почти полностью утратившие первоначальные морфологические особенности и сохранившие лишь некоторые признаки ударно-взрывного происхождения.

Характерные признаки метеоритных кратеров и астроблем детально описаны во многих работах. Их систематизация и анализ были даны в отчете по теме "Патруль" за 1990 г. (книга 6). Эти признаки могут быть разделены на три группы: 1) морфоструктурные, 2) минерало-петрографические и 3) геофизические.

Метеоритные структуры имеют кольцевую или овальную форму. Она обычно хорошо видна на аэро- и космоснимках, на геологических и геоморфологических картах. Основные морфоструктурные признаки космогенных структур: вал в виде кольцевой возвышенности вокруг воронки преимущественно молодых кратеров, центральное поднятие в кратерах с диаметром более 2-3 км в осадочных и 6-8 км в кристаллических породах, радиально-кольцевое расположение разломов, наличие брекчий. Выделяются: 1) аллогенная и перемещенная брекчия, представленная обычно крупноглыбовыми угловатыми обломками пород мишени и 2) аутигенная брекчия - интенсивно трещиноватые, даже превращенные в муку породы, сохраняющие место первоначального залегания. Реже встречаются импактиты, являющиеся продуктом кристаллизации расплава, возникающего в результате удара. Они представляют собой поли- и мономинеральные стекла, включающие обломки различных горных пород и минералов. Среди импактитов выделяются туфоподобные разновидности - зювиты. Для массивных импактитов используется термин тагамиты.

Обломки различных горных пород и минералов несут следы ударного метаморфизма, которые являются существенным отличием

космогенных структур от других геологических образований.

Хорошим макроскопическим признаком ударнометаморфизированных пород являются конусы разрушения. Это конусообразные образования различных размеров с радиально расходящимися из вершин этих конусов бороздками. Конусы разрушения чаще всего образуются в мелкозернистых породах, таких как известняк и кварциты, при давлениях от 50 до 100 кбар.

Обнаруженные признаки ударного метаморфизма являются надежным критерием диагностики космогенной природы структур, так как он может проявляться только при соударениях космических тел и термоядерных взрывах. Под ударным метаморфизмом понимаются изменения, происходящие в горных породах и минералах под воздействием мощной ударной волны в диапазоне давлений от 100 кбар до 1 Мбар и выше и сильного их разогрева (100 – 3500 °С) в течение короткого промежутка времени (от долей секунд до минуты). За исключением конусов разрушения все известные индикаторы ударного метаморфизма различимы лишь в отдельных минералах на микроскопическом уровне.

В зависимости от ударной нагрузки и послееударного разогрева Д.Штоффлер по поведению кварца и полевых шпатов в кратере Рис (ФРГ) выделяет шесть ступеней ударного метаморфизма:

0 – нулевая ступень ($p < 100$ кбар, $T < 100$ °С) характеризуется развитием трещиноватости в кварце и полевых шпатах.

I – первая ступень ($100 < p < 350$ кбар, $100 < T < 300$ °С) отличается появлением планарных элементов, т.е. системы особым образом ориентированных трещин или включений. Минералы с планарными элементами или другими оптическими и иными признаками пластических деформаций называются диаплектовыми.

2 – вторая ступень ($350 < p < 450$ кбар, $300 < T < 900$ °С), минералы без плавления переходят в так называемые диаплектовые стекла, при этом сохраняется первичная морфология зерен. Возникают и различные высокобарические полиморфные модификации (коэсит, стшовит и др.)

3 – третья ступень ($450 < p < 550 + 600$ кбар, $900 < T < 1300 + 1500$ °С), по полевым шпатам возникают мономинераль-

ные стекла плавления, имеющие пузырчатую текстуру.

4 - четвертая ступень ($550 + 600 < p < 900$ кбар, $1300 + 1500 < T < 3000$ °С), происходит полное плавление пород и возникают смешанные полиминеральные стекла.

5 - пятая ступень ($p > 900$ кбар, $T > 3000$ °С), происходит испарение силикатов.

В настоящее время признаки ударного метаморфизма установлены во многих минералах - кварце, полевых шпатах, слюдах, пироксенах и др. Наиболее хорошо изучены и определяются изменения, происходящие с кварцем и полевым шпатом. При этом прежде всего распознаются планарные структуры в кварце.

Надежным признаком ударного метаморфизма являются высокobarические минералы: коэсит, стивовит, алмаз. Мельчайшие алмазы и лонсдейлиты могут быть обнаружены с помощью электронного микроскопа.

Неопровержимым доказательством метеоритного происхождения кольцевых структур является наличие метеоритного вещества.

Геофизическими признаками космогенных кольцевых структур являются аномалии физических полей, возникающие в зоне воздействия космического взрыва. Эти аномалии исследуются геофизическими методами - гравиметрическими, сейсмическими, электро- и магнитометрическими.

Анализ работ по исследованию космогенных кратеров показывает, что выявлению первых двух групп признаков придается большее значение, чем геофизическим. Вместе с тем, гравитационные и магнитные аномалии бывают очень выразительными и их исследование облегчает и делает более полной диагностику космогенных структур.

Центральным зонам космогенных структур соответствуют относительные гравитационные минимумы, иногда осложненные локальными максимумами. В магнитном поле космогенные структуры проявляются благодаря концентрическому расположению аномалий, отражающих радиально - кольцевую сетку разломов. В центрах структур отмечается отрицательное и пониженное магнитное

поле.

Дешифрирование космических и аэровысотных снимков поверхности Земли позволило выявить многочисленные кольцевые структуры (КС). В настоящее время на космогеологической карте СССР насчитывается около 2000 КС, для которых не установлена их природа. Это, как правило, структуры с поперечником 230 – 270 км и более. Большинство геологов относят их к эндогенным образованиям.

Изучение КС поперечником от километра до десятков километров показало, что многие из них имеют вулканоплутоническую природу и лишь некоторые – космогенную. Однако ряд геологов высказывают противоположную точку зрения, утверждая, что космогенные КС широко распространены на поверхности Земли.

Данные по Луне и Земле показывают, что каждые миллион лет на Земле образуется в среднем от одного до трех кратеров диаметром свыше 20 км. Более мелкие кратеры образуются чаще. Принимая во внимание скорость эрозии, исследователи предполагают, что пока обнаружены лишь 10 % импактных кратеров диаметром более 10 км и возрастом менее 100 млн. лет.

Принято считать, что 70 % всех метеоритов падает в океан. Однако, пока обнаружен только один подводный кратер, расположенный на мелководье у берегов Новой Шотландии – структура Монтангнайс диаметром 30 км.

Существенным отличием ударных кратеров от других геологических образований являются следы ударного метаморфизма. В простых кратерах, к сожалению, они часто захоронены в брекчированных линзах. Поэтому многие кратеры до нескольких километров в диаметре лишь предполагаются космогенными, но их ударное происхождение не доказано.

Происхождение сложного кратера установить гораздо легче, поскольку в центральном поднятии обнаружены породы, подвергшиеся ударному воздействию. С другой стороны, поскольку сложные кратеры являются менее глубокими и имеют подъем в

центре, больше вероятность ошибиться и принять их за какие-то другие образования. В научных статьях подвергается сомнению ударное происхождение многих конкретных кратеров сложного типа. Это касается прежде всего самых крупных и самых старых структур, таких как Садбери в Канаде или Вредефорт в Южной Америке, первоначальный диаметр которых оценивается в 150-200 км и которые сильно изменились за последние 2 млрд. лет. Оспаривается также ударное происхождение Калужской и Пучеж-Катунской структур на территории СССР и других.

Для ударного метаморфизма требуется практически мгновенное воздействия высоких температур и давлений. Такие условия реализуются только при ударном кратерообразовании, что существенно отличает этот процесс от других геологических процессов.

На практике нередко за вулканические принимали структуры, позже идентифицированные как космогенные. Этому способствовали вулканоподобный облик импактитов, а в некоторых случаях и триггерный механизм лавоизлияния при ударе космического тела. На самом деле ударные расплавы отличаются от вулканических пород в нескольких отношениях: 1) они не связаны с обычными вулканами; 2) нередко содержат большое количество включений нерасплавленных фрагментов пород мишени; 3) в них отсутствуют внутренние границы охлаждения, из чего следует, что они были выброшены в виде одного мощного потока лавы; 4) они являются химической смесью различных пород мишени, нагретых ударом выше точки плавления, в противоположность этому вулканические породы состоят из отдельных минералов, которые плавятся при температурах и давлениях, характерных для слоев, расположенных ниже подошвы земной коры; 5) ударные расплавы могут содержать большое количество редких элементов, таких как никель, платина, иридий, кобальт, которые могли быть принесены железными метеоритами. Концентрации этих элементов в вулканических породах очень малы.

Заметим, что при взрывах вулканов максимальные давления значительно ниже, чем при метеоритных ударах. Например, при

взрыве вулкана Безымянного на Камчатке в 1956 г. давление по оценкам составило 3 кбар. Этого недостаточно даже для возникновения планарных структур, для которых требуется давление не менее 50 кбар.

Для решения вопросов о частоте и периодичности падения на Землю внеземных тел требуется провести исследования большого количества кольцевых структур и выделить среди них структуры космогенного происхождения, осуществить поиск погребенных астроблем, не выраженных или слабо выраженных в рельефе, а также океанических импактных кратеров, скрытых под толщей воды, и определить их возраст. Это чрезвычайно дорогостоящая и трудоемкая задача, поскольку идентификация отдельной космогенной структуры требует комплексных исследований (морфологических, структурных, геолого-тектонических, геофизических, обнаружения признаков ударного метаморфизма, петрографических, минералогических, геохимических, а также поиска метеоритного вещества).

В связи с этим особенно актуальной становится проблема разработки надежной методики для диагностики космогенных структур Земли, требующей по возможности наименьших трудозатрат.

Практика показывает, что комплексный анализ аэро-космических снимков, геологических карт и в особенности карт аномального магнитного поля дает возможность намечать центральные зоны предполагаемых космогенных структур, где последующими полевыми исследованиями выявляются во многих случаях признаки ударного метаморфизма горных пород. Для обоснования такой методики выделения космогенных КС и повышения ее надежности требуется тщательное изучение особенностей и закономерностей для хорошо изученных космогенных структур.

С этой целью в отчете по теме "Патруль" за 1990 г. был выполнен обзор и анализ признаков, позволяющих отличить космогенные структуры от эндогенных, проведен сравнительный анализ этих структур и начата работа по созданию банка данных импактных структур.

В данном отчете продолжена работа по разработке банка данных для импактных структур Земли, по сбору и систематизации данных и выявлению количественных закономерностей для импактных структур (разделы 1 и 2). Приведены оценки объемов пород мишени, подвергшихся переработке при ударе метеорита (раздел 3). Рассмотрены вопросы о подводных кратерах (раздел 4), методологии выявления космогенных КС (раздел 5) и намечены пути расширения базы данных для импактных структур (Заключение).

Классификация импактных структур в зависимости от степени достоверности, с которой установлено их космогенное происхождение, рассматривается в разделе 1.1. В разделе 1.2 дан обзор опубликованных каталогов импактных структур Земли.

В разделе 1.3 описан банк данных для импактных структур Земли, разработанный на персональном компьютере IBM PC/AT. База данных его содержит информацию о 125 достоверных и 110 предполагаемых импактных структурах. Для достоверных структур по сравнению с каталогом 1990 г. уточнены некоторые данные по возрасту, степени эрозии, типу пород мишени и типу структур.

Краткий обзор каталога достоверных импактных структур и некоторых соотношений между их параметрами представлен в разделе 1.5. В частности, рассмотрены: географическое распределение кратеров, зависимости числа кратеров от диаметра и возраста, связь между диаметром и возрастом кратеров, уровень сохранности кратеров в зависимости от отношения их диаметра к возрасту, распределение кратеров по степени эрозии и зависимости кумулятивного числа импактных кратеров от приведенного возраста.

Приведены морфологические соотношения для простых и сложных кратеров, зависимости амплитуды гравитационной аномалии, дефектной массы и глубины залегания ее центра тяжести от размеров структуры. Обсуждаются характер магнитных аномалий, некоторые результаты электроразведки, сейсмические характеристики импактных структур, признаки ударного метаморфизма, характер и распределение импактитов и брекчий.

В разделе 1.6 обсуждается вопрос о парных кратерах Земли и возможной природе образовавших их внеземных тел.

В разделе 1.7 дан краткий обзор каталога предполагаемых импактных структур Земли.

В разделе 2 рассмотрен вопрос о дискретности радиусов для 33 концентрических импактных структур Земли и показано, что соотношение радиусов двух последовательных кольцевых поднятий в импактных структурах составляют приблизительно $\sqrt{2}$, либо целую степень этого числа при отсутствии отдельных соседних колец.

Объемы горных пород, которые подверглись преобразованию при ударе метеорита, определяются энергией соударения, свойствами ударяемого тела, а также строением и свойствами пород мишени. Эти вопросы кратко обсуждаются в разделе 3, где рассматривается связь энергии удара и размеров кратера, а также приведены оценки параметров ударных волн, объемов испаренного и расплавленного вещества, размеров зоны разрушения при кратерообразовании и зависимости гравитационной аномалии от разуплотнения пород в кратерной области.

Проблема поиска ударных структур в океане практически не решена. Имеется лишь несколько сообщений об открытии таких структур. Этот вопрос обсуждается в разделе 4.

В разделе 5 рассматриваются вопросы методологии поиска и диагностики космогенных структур Земли как на суше, так и в океане, и ставится, в частности, вопрос о необходимости разработки оптимальной стратегии поиска космогенных структур.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ указывается, в частности, на некоторые возможности использования разработанного здесь банка данных импактных структур Земли, а также на необходимость проведения работ по сбору и анализу дополнительной информации об импактных структурах с целью использования в перспективе банка данных для диагностических целей.

Написание разделов I.3, I.4, I.7, разработка базы данных для импактных структур Земли и оформление отчета (подготовка иллюстративного материала - каталогов достоверных и предполагаемых импактных структур Земли, таблиц, рисунков, набор текста на ЭВМ) выполнено Ляпидевской З.А.

Введение, разделы I.1, I.2, I.5, I.6, 2-5, и Заключение написаны Петренко В.Е.

1. БАНК ДАННЫХ И НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЛЯ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ

ВВЕДЕНИЕ

Важными направлениями в исследовании закономерностей метеоритной бомбардировки Земли являются, в частности: установление распространенности кратеров по поверхности Земли, времени и частоты их образования и условий сохранности; изучение внутреннего строения ударных структур и его усложнения с увеличением их диаметров; изучение ударной переработки пород при метеоритном ударе в мишенях различного состава и в зависимости от масштабов ударного события.

При проведении этих и ряда других исследований используются сводки данных об ударных кратерах. В настоящее время опубликовано несколько каталогов ударных кратеров космогенного происхождения разной степени изученности [1-16].

Работа с этими каталогами (выборка по заданному критерию, получение статистических оценок некоторых параметров, нанесение на карту, построение распределения числа структур по размерам, возрасту, морфологии, континентам и другим важным характеристикам) требует больших затрат времени исследователя. Создание компьютерной базы данных (БД) ударных структур и хранение информации на дисковых магнитных носителях позволяет автоматизировать многие операции сбора и обработки информации об этих структурах.

В настоящей работе предпринята попытка создания автоматизированной БД по космогенным структурам Земли на персональной ЭВМ IBM PC/AT в рамках операционной системы MS-DOS.

Чтобы не исключать из рассмотрения сильно разрушенные космогенные структуры - астроблемы, образованные в результате высокоскоростного удара метеороида, астероида или кометы, в этой работе иногда кратером будет называться не только метеоритный кратер, но и любое геолого-геофизическое проявление, по которому можно заключить, что в данном месте произошел

ударно-метеоритный взрыв, и оценить масштабы этого события. При таком общем подходе кратер характеризуется не только его морфологией. Ударная структура представляет собой совокупность признаков – морфологических, геолого-геохимических, геофизических. Одни из них исчезают достаточно быстро (например, рельеф), другие могут оставаться практически неизменными с момента образования структуры (например, расплав или высокотемпературные минералы). Таким образом, отнесение структур к космогенным должно учитывать все многообразие фактов, накопленных исследователями.

1.1. О КЛАССИФИКАЦИИ УДАРНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ ПО СТЕПЕНИ ДОСТОВЕРНОСТИ ИХ КОСМОГЕННОЙ ПРИРОДЫ.

При классификации ударных кратеров зарубежные авторы нередко используют терминологию, предложенную Денсом [13], который выделяет три группы кратеров:

- 1) *Метеоритные кратеры* – это кратеры, содержащие обломки метеоритного вещества.
- 2) *Вероятные импактные кратеры* – это структуры, в породах которых установлены определенные признаки ударного метаморфизма, но не найдено метеоритное вещество.
- 3) *Возможные импактные кратеры* – это структуры, в породах которых признаки ударного метаморфизма не установлены и не найдено метеоритное вещество. Вместе с тем эти образования по структуре и морфологии, выраженности в геофизических полях и наличию брекчий могут быть предположительно отнесены к космогенным.

Заметим, что небольшие молодые импактные структуры могут иметь фрагменты ударяющих тел, так как они образуются при ударе относительно малых тел с малыми скоростями, что обусловлено сопротивлением атмосферы или их разрушением при прохождении через атмосферу. Сохранение фрагментов ударяющего тела в больших структурах является достаточно редким событием, вероятность которого обратно пропорциональна массе ударника

и скорости соударения. Возникающие при больших скоростях удара давление и температура являются достаточными, чтобы испарить и расплавить ударяющее тело.

Метеоритное вещество не сохраняется в течение длительного времени на поверхности Земли. И действительно, все *метеоритные кратеры* являются геологически молодыми образованиями. Некоторые исследователи сомневаются в возможности доказать принадлежность *вероятных импактных кратеров* к ударным образованиям, поскольку трудно установить наличие метеоритного вещества. Это также мешает диагностировать ископаемые ударные кратеры как палеоимпактные образования.

Большая часть исследователей, учитывая физику высокоскоростного удара, считает, что совокупность ряда признаков ударного метаморфизма должна быть определяющей для диагностики импактных кратеров в такой же степени, как и наличие осколков метеоритного вещества. Чтобы более точно отразить современное понимание ударных процессов, Ман [16] модифицировал классификацию импактных структур, предложенную Денсом.

Ман сохранил названия двух классов: *вероятные и возможные импактные кратеры*, изменив их содержание, а класс импактных кратеров разделил на две группы: *импактные кратеры типа-1* и *импактные кратеры типа-2*. Кратеры, содержащие обломки метеоритного вещества, были отнесены к *типу 1*. Кратеры с такими признаками ударного метаморфизма, как оптические планарные элементы, полиморфные превращения кварца, диаплектовые минералы, конусы разрушений, были названы *импактными кратерами типа-2*.

Согласно Ману, *вероятные импактные кратеры* - это структуры, в породах которых следы метеоритного вещества и признаки ударного воздействия установлены с малой степенью достоверности. Вместе с тем локально наблюдается сильное брекчирование и дробление пород, наполненные брекчиями разломы, перевернутая стратиграфия закратерных выбросов, локальная отрицательная аномалия силы тяжести, уменьшение сейсмических скоростей, следы аномальных концентраций элементов космического

происхождения.

Возможные импактные кратеры – это геологические образования, структура и морфология которых характеризуется такими чертами, как округлая форма, концентрические желоба и рифты, хаотически поднимающиеся центральные структуры, система радиальных и концентрических разломов, возвышающиеся валы или любые другие образования, которые не являются структурами эндогенной природы, но могут быть предположительно отнесены к космогенным образованиям.

В отечественной литературе отсутствует единая терминология. Кратеры, содержащие обломки метеоритного вещества, нередко называют *установленными метеоритными кратерами*. Часто используются термины *достоверные ударные кратеры* или *достоверные космогенные кратеры (структуры)* для обозначения установленных метеоритных кратеров и структур, в породах которых выделены определенные признаки ударного метаморфизма, но не найдено метеоритное вещество. Например, Вальтер и Гуров [1] выделяют *достоверные метеоритные кратеры* и *достоверные, но недостаточно изученные* (в основном в отношении формы, размеров и возраста). Во всех последних структурах установлены признаки ударного метаморфизма или конусы разрушения, однако эти данные также являются неполными или предварительными.

Структурами *вероятного импактного происхождения* называют такие, в породах которых признаки ударного метаморфизма еще не установлены и не найдено метеоритное вещество. Вместе с тем они по морфологии, выраженности в геофизических полях и наличию брекчий могут быть предположительно отнесены к космогенным. Другие авторы называют такие структуры *предполагаемыми импактными*.

Структуры, диагностика которых основана на анализе комплекса признаков, важнейшим из которых является ударный метаморфизм, Масайтис [6] называет *достоверно диагностированными астроблемами*.

Заметим, что списки *достоверных импактных структур* обычно содержат структуры, диагностированные как космогенные об-

разования с различной степенью достоверности.

1.2. ОБЗОР КАТАЛОГОВ УДАРНЫХ КРАТЕРОВ ЗЕМЛИ.

Дадим краткий обзор некоторых каталогов ударных кратеров Земли.

Один из первых каталогов описан в работе Денса [13]. Ударные кратеры в зависимости от того, с какой степенью достоверности была установлена их космогенная природа, были разделены на три класса: 1) *метеоритные кратеры*, 2) *вероятные импактные кратеры*, 3) *возможные импактные кратеры*. Классификация Денса использовалась и при описании самого большого каталога [12], содержащего 230 структур, из которых 54 были отнесены к *вероятным импактным структурам*.

В каталог [2] включены *метеоритные кратеры и вероятные импактные структуры* метеоритного происхождения. Всего в каталоге содержится 115 образований. Только 6 из них расположены на территории СССР. Каталог составлен в виде таблицы, в которой приведены: 1) порядковый номер образования; 2) название и русская транскрипция; 3) страна; 4) географические координаты; 5) характер образования (кратер, залив, озеро, геологическое возмущение, бассейн, островная дуга) и их число; 6) диаметр (в случае нескольких образований - диаметр крупнейшего); 7) глубина (для депрессий, в случае нескольких образований - глубина крупнейшей); 8) основные морфологические детали и форма образования (депрессия, вал, центральное поднятие, кольцевая депрессия, кольцевое поднятие; круг, эллипс, неправильной формы); 9) диагностические признаки ударного происхождения (брекчия, стекло, коэсит, конусы разрушения, плоскостные системы, изотропия кварца, гравитационные аномалии, магнитные аномалии, осколки метеоритов). Каталог является неполным. Подробное исследование структур выполнено лишь в отдельных регионах Земли (в основном в США и Канаде).

В каталоге [15] для обозначения метеоритных кратеров используется термин *доказанные метеоритные импактные кратеры*.

ры . Все рассмотренные кратеры являются геологически молодыми образованиями. Они относятся к числу простых, имеющих чашеобразную форму. Все кратеры имеют частично сохранившийся вал, а некоторые из них - сохранившиеся закратерные выбросы. Каталог содержит лишь данные о координатах кратеров, числе образований и диаметре.

Данные для *вероятных импактных структур* расширены. Они включают кроме выше названных состав пород мишени (осадочные, кристаллические, осадочные и кристаллические); степень эрозии (1 - закратерные выбросы преимущественно сохранились; 2 - закратерные выбросы сохранились частично; 3 - выбросы размыты, вал частично сохранился; 4 - вал сильно эродирован, заполняющие вал коптогенные породы сохранились; 5 - заполняющие вал коптогенные породы сохранились частично; 6 - сохранились лишь остатки коптогенных пород, заполняющих кратер, обнажено истинное дно кратера; 7 - вскрыта глубинная структура деформированного цоколя под истинным дном кратера); морфологию (простой, сложный с центральным поднятием, сложная многокольцевая структура).

Данные для *возможных импактных структур* сильно ограничены (скудны). Приведены лишь координаты, диаметр и возраст структур.

Каталог [15] содержит данные о 13 (3 - на территории СССР) *доказанных метеоритных кратерах*, о 78 (21 - на территории СССР) *вероятных импактных структурах* и 50 (7 - на территории СССР) *возможных импактных образованиях*. Этот каталог, относящийся к 1978 году, содержит на 36 *вероятных импактных структур* больше, чем каталог [13] 1972 года, что указывает на большую скорость обнаружения новых структур с признаками ударного метаморфизма. Ни одна из 21 *вероятных импактных структур*, расположенных на территории СССР и содержащихся в каталоге 1978 года, не была включена в каталог 1972 года.

В работе Масайтиса [8] приведены краткие сведения о 19 астроблемах на территории СССР. Диагностика этих структур основана на анализе комплекса признаков, важнейшим из которых

является ударный метаморфизм. Принимается также во внимание и наличие самой морфоструктуры или ее сохранившихся частей. Большинство этих астроблем исследовано и оконтурено геолого-геофизическими методами, многие из них подвергались бурению. В соответствующих графах таблиц указаны: видимый диаметр, морфология (впадина, вал, в том числе погребенные; центральное и кольцевое поднятие; кольцевые депрессии); признаки ударного метаморфизма (взрывные брекчии, обломочные импактиты, массивные импактиты, конусы разрушения, диаплектовые минералы и стекла, гипербарические фазы); распыленное метеоритное вещество; возраст (геологический и радиологический).

Несмотря на различие астроблем по размерам, геологическому возрасту, по особенностям внутреннего строения и состава залегающих в них пород, в работе предпринята попытка выделить ряд общих особенностей астроблем и охарактеризовать их в целом.

В работе [1] приведен список *достоверных метеоритных кратеров* (83 структуры), *достоверных, но недостаточно изученных* (8 структур) и *вероятных импактных структур* Земли (14 структур). К последней группе отнесены недостаточно изученные структуры, в породах которых признаки ударного метаморфизма еще не установлены и не найдено метеоритное вещество. Вместе с тем эти структуры по морфологии, выраженности в геофизических полях, и наличию брекчий могут быть предположительно отнесены к космогенным.

Отнесение структур к *достоверным метеоритным кратерам* производилось на основе анализа комплекса следующих основных признаков:

- Морфологический (округлые очертания, усложнение формы с ростом размеров, центральное поднятие у кратеров диаметром 5-30 км, кольцевые поднятия и депрессии у кратеров диаметром более 30 км).
- Метеоритное вещество (обнаружение метеоритных обломков, метеоритной пыли и металлических сферул, образовавшихся в ре-

зультате конденсации из облака при метеоритном взрыве. Учитывалось повышение содержания никеля и кобальта в 3-5 раз по сравнению с породами мишени.

- Конусы разрушения (образования, связанные с достижением динамического предела упругости горных пород (15-20 кбар) и возникающие вдоль границы пластически и упруго деформированных пород).

- Ударный метаморфизм минералов.

- Ударное плавление (ударные стекла отличаются от стекол иного генезиса наличием признаков перегрева и обломков ударно метаморфизированных пород).

- Наличие высокобарических модификаций (коэсит, стивовит и др.).

- Геофизические признаки (локальная отрицательная аномалия силы тяжести, особенности проявления кратеров в магнитных и электрических полях).

Всего диагностика достоверных метеоритных кратеров включает 12 признаков. Для каждого кратера указаны также значения диаметра и возраста.

Ударный метаморфизм минералов применялся в качестве основного критерия диагностики достоверных, но недостаточно изученных метеоритных кратеров. Из других признаков использовались: морфологический (простой, сложный), конусы разрушения, импактиты, стекла, гравитационные аномалии.

Отнесение к вероятным метеоритным кратерам было произведено на основании наличия следующих признаков: брекчии, ударный метаморфизм, конусы разрушения, стекла плавления, нарушенное залегание осадочных пород, система радиальных и концентрических разломов, а также предполагаемое наличие метеоритного вещества.

В работе [5] приведены данные о сохранности астроблем и метеоритных кратеров на территории СССР (29 структур), Финляндии (2 структуры), Швеции (2 структуры) и Северной Америки (37 структур). Обсуждаются условия сохранности по следующим

группам кратеров:

1. Открытые кратеры.

- 1.1 Хорошей сохранности с первичной кратерной воронкой и насыпным валом.
- 1.2 Средней сохранности с остатками кратерной воронки и иногда кольцевого поднятия коренных пород.
- 1.3 Средней сохранности с остатками разных элементов сложных кратеров (центрального поднятия, кольцевой впадины, кольцевых разрывов).
- 1.4 Плохой сохранности, лишённые первичных, выраженных в рельефе кратерных форм.
 - 1.4.1 С положительными вторичными формами рельефа на месте центрального поднятия, кольцевого поднятия и др.
 - 1.4.2 С отрицательными вторичными формами рельефа, возникшими при разрушении брекчий основного кратера.

2. Погребённые структуры.

- 2.1 Молодые структуры под покровом мезозойских и кайнозойских отложений.
- 2.2 Древние структуры, в перекрывающий комплекс которых входят палеозойские отложения.

3. Вторично открытые структуры.

- 3.1 С остатками покрова, консервирующего первичную кратерную воронку.
- 3.2 С остатками покрова, частично перекрывающего и консервирующего первичную кратерную воронку.
- 3.3 Лишённые консервирующего покрова с остатками разных элементов кратерных структур (центрального поднятия, кольцевой впадины и др.).

Для рассмотренных в работе [5] структур отмечено наличие ударного метаморфизма, приведены значения диаметра, выраженности на аэрофотоснимке, геологический и радиологический возрасты, характеристики пород мишени.

В работе [4] даны сведения о диаметре и возрасте 116 кратеров Земли и для каждого из них указан метод определения его возраста.

В работе [10] содержится список 100 *достоверных метеоритных кратеров* Земли. Приведены данные о диаметре кратера, возрасте, о наличии метеоритного вещества (осколки метеоритов, металлические сферулы, аномальное содержание Ni и Co), конусов разрушения, ударного метаморфизма и высокобарических фаз.

Географические координаты, диаметр и возраст 115 импактных структур Земли приведены в работе [14]. Диагностика импактных структур выполнена на основе наличия метеоритного вещества и (или) признаков ударного метаморфизма.

В работе [3] приведен список 115 *достоверных метеоритных кратеров и астроблем* (для которых установлено присутствие метеоритного вещества и (или) признаков ударного метаморфизма пород), что на 20-25 структур превышает количество ударных структур, диагностированных к 1978 - 1979 годам [1,15]. Кроме того, приведены данные о диаметре кратеров, их строении (простая чашеобразная форма, структуры с центральным поднятием, структуры кольцевой формы), составе пород (осадочные, кристаллические, смешанные), о наличии метеоритного вещества (распыленное метеоритное вещество, обломки метеоритов, примеси вещества ударника в составе распыленных импактитов), о возрасте и сохранности (7 перечисленных выше уровней).

В работе [9] представлен каталог 122 астроблем и метеоритных кратеров Земли, в котором приведены краткие характеристики структур и по возможности количественные данные. Последнее обстоятельство выгодно отличает этот каталог от других.

Для выделения астроблем применялся следующий комплекс диагностических признаков [17] :

- Бескорневой характер структуры :

- а) глубина затухания зоны дробления меньше диаметра;
- б) отношение глубины центра тяжести гравинаомалии к диаметру лежит в пределах 0,1 - 0,25 ;
- в) отсутствие подводющего канала с магматическим выполнением ;

- г) наличие в расплавленных импактитах ксенолитов только вмещающих пород, т.е. пород, затронутых процессом дробления (фрагменты материала, слагающего земную кору, отсутствуют) ;
- Наличие центрального поднятия.
 - Наличие признаков взрыва :
 - а) конусы разрушения ;
 - б) диаплектовые преобразования минералов (дробление, образование полос смятия, планарные трещины, планарные элементы, понижение показателя преломления, плотности, термическое разложение и др.) при нагрузках 0,1 Мбар и более;
 - в) ударная витрификация минералов (превращение кристаллов минералов в рентгеноаморфное оптически изотропное вещество без расплавления - диаплектовое стекло) ;
 - г) высокобарные фазы (стишовит, лонсдейлит, чаоит, коэсит, алмаз) ;
 - д) затухание ударного воздействия с глубиной ;
 - Специфические особенности расплава (стекол) :
 - а) температура в диапазоне 2000 - 2500 °С ;
 - б) скорость закалки стекла более 50 °С/с ;
 - Наличие метеоритного вещества.

Краткий обзор каталогов астроблем и метеоритных кратеров показывает, что основным диагностическим критерием космогенных структур являются признаки ударного метаморфизма. В работах последнего времени прослеживается тенденция формирования комплекса диагностических критериев, учитывающих геолого-геофизические, петрографические, минералогические и геохимические характеристики кольцевых структур и слагающих их пород. Применение комплексных критериев значительно повышает степень достоверности при диагностике космогенных структур.

Большинство структур, относимых в настоящее время к космогенным, выявлено за последние 20 - 25 лет. Ежегодно список кратеров пополняется двумя - четырьмя структурами.

В работе [11], относящейся к 1979 г. Вальтер и Гуров полагают, что число открываемых импактных кратеров, начиная с 1960 г. растёт по экспоненциальному закону :

$$N = \exp(2,83 + 0,12 * t)$$

где N - количество открываемых кратеров, t - время в годах, начиная с 1960 г. Таким образом, с 1960 г. по 1975 г. общее количество импактных кратеров удваивалось каждые 5,8 года. Эти авторы считают, что характер зависимости $N(t)$ указывает на значительный резерв ещё не открытых импактных структур на поверхности Земли.

1.3. ОПИСАНИЕ БАНКА ДАННЫХ ДЛЯ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ

Банк данных для импактных структур Земли разработан на персональном компьютере IBM PC/AT. Он содержит базу данных (БД) на основе входного языка системы управления БД dBASEIII с использованием операционной системы MS - DOS [18] и ряд вспомогательных программ обработки данных, использующих входной язык, Фортран и графическую систему СМОГ.

По сравнению с работой [19], в которой представлена БД для 125 *достоверных импактных структур* Земли, в настоящем описании уточнен возраст 12 структур, а также некоторые данные по степени эрозии, типу пород мишени, типу структур. Дополнительно в БД введены сведения о 110 *предполагаемых импактных структурах*. Кроме того, расширены возможности обработки информации путем использования графических средств.

В основу БД положен каталог [9], содержащий наиболее полные данные по сравнению с другими каталогами о 122 структурах с разной степенью достоверности относимых к космогенным образованиям, а также каталог [2], включающий 115 структур как достоверных, так и предполагаемого космогенного происхождения.

Из каталога [9] были использованы следующие данные: названия структур и их синонимы, количество объектов, часть

света, страна и местоположение, диаметр центрального (кольцевого) поднятия, характер аномалии – гравитационная или магнитная, конусы разрушения, диаплектовый минерал и стекло, высокобарическая фаза, метеоритное вещество, импактиты.

Из других каталогов были использованы следующие данные:

- [14]: координаты, диаметр, геологический возраст;
- [3]: тип структуры (П – простая чашеобразной формы, Ц – с центральным поднятием, К – кольцевая структура), тип пород мишени, степень эрозии;
- [11]: вид с орбиты Земли, глубина, характер образования (кратер, озеро, геологическое возмущение, дуга, бассейн, залив), форма (круг, кольцо, овал, эллипс, 4-угольник, неправильная);
- [6]: степень эрозии, рельеф истинного дна кратеров;
- [2]: глубина, морфология (д – депрессия, в – вал, кд – кольцевая депрессия, кп – кольцевое поднятие), форма, признаки ударного метаморфизма, характер образования;
- [5]: более подробные данные о типе пород мишени;
- [1]: информация о структурах предполагаемого космогенного происхождения;
- [4] – уточнен возраст следующих структур: Боксхол, Вульф Крик, Далгаранга, Кефельс, Одесса, Ротер Камм, Сихотэ-Алинь, Скелетон, Треморжио, Уэтампка, Хэвиленд, данные по которым не встречались в других каталогах.

На основе указанных каталогов создана БД, включающая 125 *достоверных импактных структур* Земли (122 из [9] и 3 структуры – Огтон, Ред Уинг, Серпент Маунд – из [6]) и 110 менее изученных структур, которые отнесены к *предполагаемым импактным структурам* (ниже указаны источники, из которых брались данные о структурах).

- [3]: Би Блаф, Ричао Ринг, Спайдер, Тигуа, Фромборк, Чульман.
- [10]: Мекатина, Хуммельн, Штопенхейм, Лабынкыр.
- [14]: Коноли Базин, Игл Бат, Пижанини, Рогозинский, Виверс.
- [11]: Акроман, Шангхеван, Итуральде, Аорунга, Лак Айро, Аль

Мадафи, Хабхаб.

- [4]: Ярдымлы, Догибайазид, Випфельсфурт, Елбоу, Ридвинг-Крик, Байдарацкий, Св.Мартин, Ла Мальба, Мичиган.
- [1]: Дайкес, Ришат, Бодензее, Борлы, Джесказганский, Д'Аф-лоу, Жуан-Тобе, Ишимский, Каибско-Чуйский, Ле-Шене-вье-Шан-Мезель, Оман Ринг, Северо-Коунрадская, Токра-уская.
- [5]: Байбасунская, Балхашская, Торткульская, Савоноски, Ситилеменкат.
- [2]: Потомский, Уджей, Чинге, Агейр, Эль-Умчаймин, Амак, Арнхемленд, Багдад, Басра, Каролина, Крестон, Дес-Плейнс, Дакуотер, Элеганте, Эллеф Рингнес, Эль Мрей-ти, Эйре, Галлуедек, Гарет-эль-Лефет, Гласфорд, Гур-ма, Зал. св. Лаврентия, Гваркух, Хагенс Фьорд, Хау-элл, Джемта Ноб, Калкоп, Кили, Килмайкл, Ливийская пустыня, Макамик, Мальха, Меджауда, Мелвилл, Менихек, Мерриуэлл, Мичакамау, Мишлифен, Мора Каунти, Маунт Дорин, Настапока, Нобиевале, Панаминт, Парри Саунд, Претория Солт-Пан, Соль-о-Кошон, Семсият, Сокотра, Сю-си-ан-Брик, Темимшат-Галламан, Тиффин, Тверен, Унга-ва, Уилберджер Каунти, Земля Уилкса, Уинклер.

Данные по структурам Долунь, Шеветан, Печенежская, Тунис, Косьцежина взяты из РЖ Геология за 1990 г.

Следует отметить, что имеются некоторые расхождения данных в различных каталогах, связанные, по-видимому, с разной степенью изученности структур. Для БД брались наиболее поздние данные из указанных выше каталогов.

Таким образом, общее количество структур в БД составляет 235, каждая из которых характеризуется 24-мя признаками. Информация о признаках содержится в соответствующих полях БД. Они отражают морфологические, геологические, геофизические, ударно-метаморфические признаки и ряд других. Более подробное описание полей дано в п.1.4.

Входной язык dBASEIII позволяет составлять вспомога-тельные программы для анализа данных, выборки данных по раз-

личным критериям, составлять каталоги и таблицы, упорядочивать данные по заданным признакам. Использование графической системы СМОГ дает возможность по известным географическим координатам структур изображать их на карте, что дает наглядное представление о расположении структур.

Ниже приведен каталог 125 достоверных импактных структур Земли. Для удобства пользования он дается в двух вариантах.

Первый вариант каталога содержит все поля БД за исключением одного - "страна, местоположение", однако в нем ради компактности представления не приведены числовые значения геофизических аномалий и не конкретизированы признаки ударного метаморфизма. Их наличие отмечается лишь символом "+". Структуры в этом варианте каталога упорядочены в алфавитном порядке.

Во втором варианте каталога структуры сгруппированы по континентам. При этом конкретизированы вид и состав метеоритного вещества, признаки ударного метаморфизма (высота конусов разрушения, состав диаплектовых минералов и стекол, высокобарические фазы минералов, состав импактитов и брекчий) и даны числовые значения гравитационных и магнитных аномалий.

1.4. ПОЯСНЕНИЯ К КАТАЛОГУ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ

Ниже дается описание полей БД для каталога достоверных импактных структур Земли.

Название структуры – на русском и английском языках, в скобках указаны синонимы. Отмечается также число объектов в кратерном поле.

Часть света.

Страна, местоположение.

Координаты (широта, долгота) – географические координаты центра структуры.

Возраст (млн. лет) – геологический возраст.

Степень эрозии указана цифрами:

- 1 – закратерные выбросы преимущественно сохранились;
- 2 – закратерные выбросы сохранились частично;
- 3 – закратерные выбросы и цокольный вал размыты;
- 4 – коптогенные породы, заполняющие вал, сохранились;
- 5 – коптогенные породы, заполняющие вал, сохранились частично;
- 6 – сохранились лишь остатки коптогенных пород, заполняющих кратер, обнажено истинное дно кратера;
- 7 – вскрыта глубинная структура деформированного цоколя под истинным дном кратера;

Диаметр (км) – при наличии нескольких структур приводится диаметр крупнейшей.

Глубина (м) – для депрессий.

Диаметр центрального (кольцевого) поднятия (км) – при наличии нескольких указан диаметр крупнейшего.

Характер образования – кратер, залив, озеро, геологическое возмущение, бассейн, купол, остров, бухта.

Тип структуры (П – простая чашеобразной формы, Ц – с центральным поднятием, К – кольцевая структура).

Рельеф истинного дна – простой, сложный, сложный с кольцевым поднятием.

Морфология - описаны морфологические особенности структур: д - депрессия, в - вал, цп - центральное поднятие, кд - кольцевая депрессия, кп - кольцевое поднятие

Форма - описывается форма структуры (круг, эллипс, кольцо, овал и др.).

Метеоритное вещество - отмечается наличие метеоритного вещества: ж - остатки железных, ж-к - железо-каменных, к - каменных метеоритных тел. Буквы без скобок соответствуют наличию обломков метеоритов, в круглых скобках - продуктов их плавления в виде сферул и других образований, в звездочках - распыленного метеоритного вещества. Буква **а** указывает на аномальное содержание Ni, Co.

Конусы разрушения (м) - дана высота конусов разрушения в метрах или знаком + отмечено их наличие.

Аномалии разделены на **гравитационные** и **магнитные**. В некоторых случаях указывается только знак (+ или -), либо символом * отмечается их присутствие.

Импактиты, брекчии - отмечается наличие импактитов и брекчий: ат-аутигенные, ал-аллогенные брекчии, з-зювиты, с-расплавленные стекла, т-раскристаллизованные расплавы; и-импактиты, б-брекчии.

Диаплектовый минерал и стекло. Введены следующие обозначения: ап-апатит, бд-бадделит, би-биотит, гл-глауконит, гр-гранат, гф-графит, и-ильменит, ка-кальцит, кв-кварц, крд-кордиерит, л-лешательерит, му-мусковит, п-пироксен, пшп-полевые шпаты, ро - амфибол, сил-силлиманит, сл-слюда, ствр-ставролит, с -сфен, т-турмалин, хл-хлорит, ц-циркон, э-эпидот; д-диаплектовые стекла, пс-плоскостные системы, и-изотропия кварца.

Высокобарическая фаза обозначена символами: кс-коэсит, ст-стишовит, у-углерод, м-мейджорит.

Тип пород мишени (КР - кристаллические, ОС - осадочные, СМ - смешанные породы).

Характеристика пород мишени. Обозначения геологических эпох заимствованы из геохронологической таблицы: KZ – кайнозойская, MZ – мезозойская, PZ – палеозойская, PR – протерозойская эры, AR – архей; N – неогеновый, Pa – палеогеновый, K – меловый, J – юрский, T – триасовый, P – пермский, C – каменноугольный, D – девонский, S – силурийский, O – ордовикский, Se – кембрийский, DC – докембрийский периоды.

Введены также следующие сокращения: Б.-Балтийский, К. – Канадский, У. – Украинский, щ. – щит; В-Е – Восточно-Европейская, С.-сибирская, С-А – Северо-Американская, пл. – платформа; скл.к. – складчатый комплекс; осад. – осадочные, крист. – кристаллические, вулк. – вулканические, пес.-глин. – песчано-глинистые, изв. – известняки, п. – породы, отл. – отложения; ф. – фундамент, ч. – чехол.

Вид с орбиты Земли. Отмечается качество видимости структуры с орбиты Земли (плохое, хорошее, среднее и др.).

Приведенный возраст кратера – отношение возраста кратера в годах к его площади в квадратных метрах (T / S).

1.5. КРАТКИЙ ОБЗОР КАТАЛОГА ДОСТОВЕРНЫХ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ И АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ

В этом разделе дается краткий обзор представленного выше каталога достоверных импактных структур Земли, рассмотрены некоторые общие закономерности для импактных структур, приведены соотношения между различными параметрами кратеров и обсуждаются методы и результаты исследований импактных структур на основе литературных источников.

1.5.1. Распределение кратеров на поверхности Земли.

В каталоге содержится 125 импактных кратеров различного диаметра. Распределение кратеров по материкам на земной поверхности дано в таблице 1.1:

Таблица 1.1

Распределение кратеров на поверхности Земли.

Австралия	10	
Азия	17	(в том числе 13 в СССР)
Америка Северная	44	(в том числе 16 в США, 28 в Канаде)
Америка Южная	4	
Африка	12	
Европа	38	(в том числе 23 в СССР)
Всего	125	структур

Географическое распределение кратеров, показанное на рис. 1.1, отражает неравномерность размещения их на земной поверхности слабую изученность ее в вопросах кратерообразования.

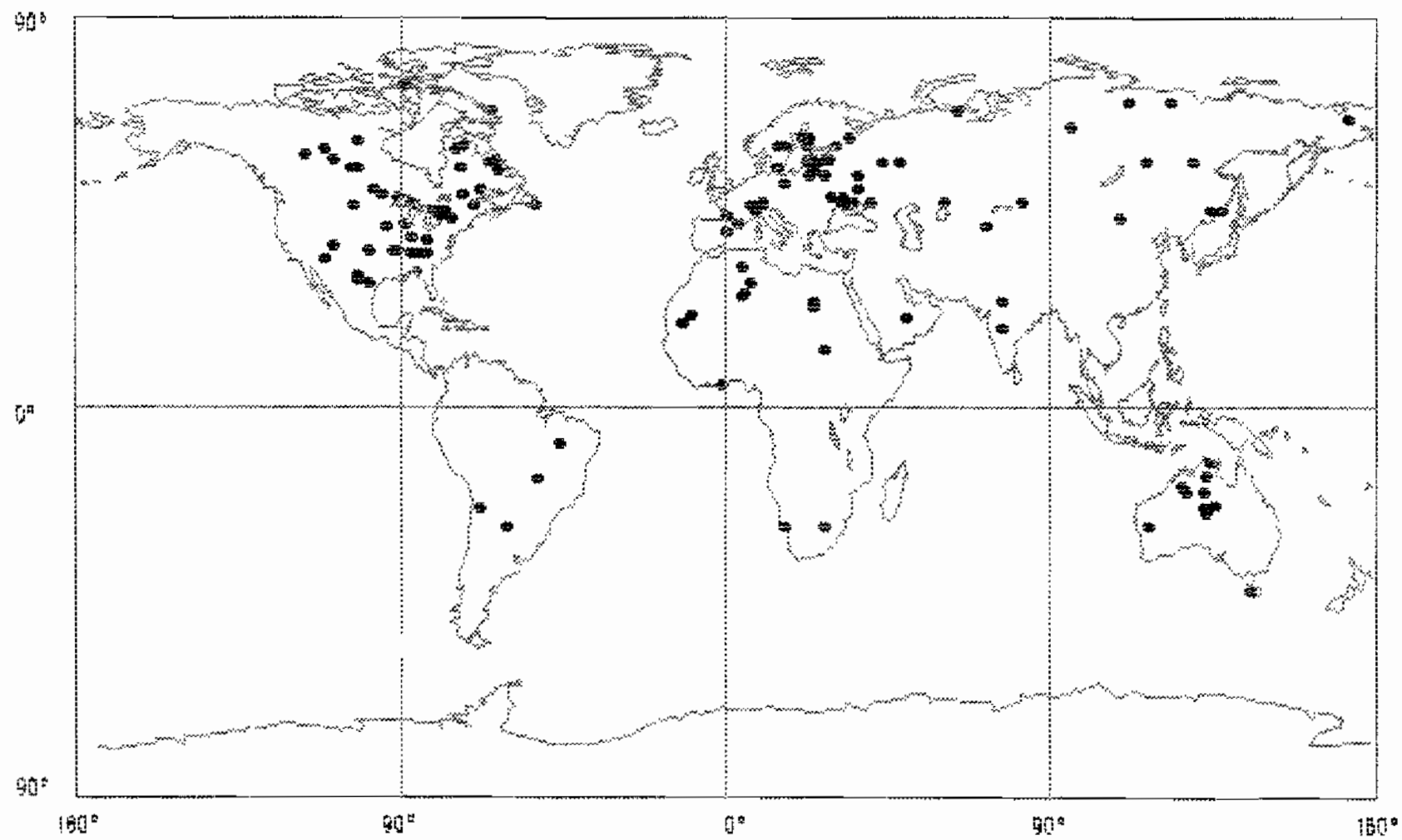


Рис. 1.1. Достоверные импактные структуры Земли

1.5.2. Распределение кратеров по размерам.

Кратеры имеют округлую в плане форму размерами от нескольких метров до сотен километров. Большая их часть (65.6%) принадлежит структурам размером 2-32 км. Среди них наиболее часто встречаются кратеры среднего размера с поперечником 8-16 км (см. Таблицу 1.2).

Таблица 1.2

Распределение кратеров по диаметру

Диаметр (км)	Число структур	%
< 0.5	20	16.0
0.5 - 1	2	1.60
1 - 2	9	7.20
2 - 4	19	15.20
4 - 8	22	17.60
8 - 16	23	18.40
16 - 32	18	14.40
32 - 64	8	6.40
> 64	4	3.20

(Общее число кратеров = 125)

К мелким кратерам (менее 8 км) здесь отнесены также 14 кратерных полей, содержащих от 2 до 122 кратеров (Эро во Франции - 5 шт., Хенбери в Австралии - 13 шт., Сихотэ-Алинь в СССР - 122 шт. и т.п.). Данные о размерах некоторых кратеров в различных каталогах различаются. Таблица 1.3 иллюстрирует это различие на примере каталогов [9] и [14]. Причина этой неопределенности не всегда ясна.

Таблица 1.3

Сравнение диаметров некоторых структур в каталогах
[9] и [14]

	[9]	[14]
Вредефорт	60.000	140.000
Деллен	12.000	15.000
Дип Бэй	9.000	12.000
Карсвелл	39.000	37.000
Крукид Крик	7.000	5.600
Кутюр	12.000	8.000
Лапшярви	10.000	14.000
Логойский	10.000	17.000
Маникуаган	65.000	100.000
Мидлсборо	7.000	6.000
Мин	6.000	5.000
Пайлот	6.700	6.000
Рис	23.000	24.000
Рошшуар	15.000	23.000
Садбери	72.000	140.000
Стренгуэйс	16.000	24.000
Сьерра Мадера	12.000	13.000
Тин Бидер	6.000	7.000
Уаркзис	2.500	3.500
Холефорд	2.500	2.000
Шарлевуа	42.000	46.000

На рис.1.2 представлено интегральное $K(D)$ (количество кратеров диаметром D и больше) и дифференциальное $N(D)$ распределения кратеров по размерам.

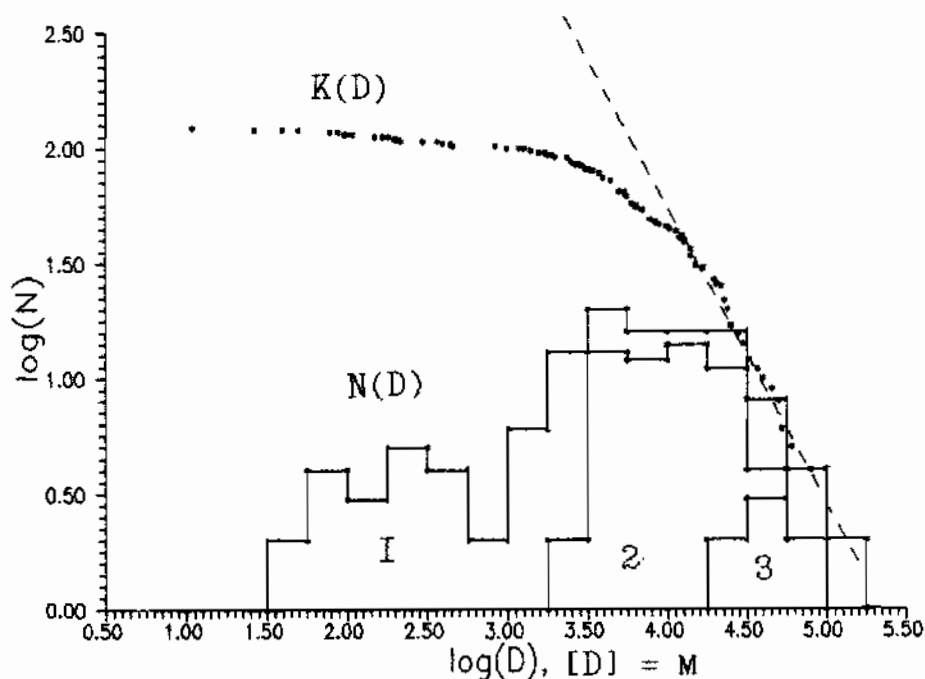


Рис. I.2. Интегральное $K(D)$ и дифференциальное $N(D)$ распределения кратеров по размерам D . (Общее число кратеров = 125). 1 - все кратеры, 2 - кратеры с центральным поднятием, 3 - кратеры с кольцевым поднятием.

Для диаметров $D = 10 - 100$ км справедлива следующая зависимость:

$$\log K = 6,9 - 1,3 \log D \quad (I.I)$$

Дифференциальная кривая (рис. I.2) дает более детальное представление о концентрации кратеров определенного диаметра. Кратеры с кольцевым и центральным поднятием смещены в сторону кратеров большего размера.

1.5.3. Распределение кратеров по возрасту.

Возраст кратеров изменяется от современного (Сихотэ-Алинь, СССР) до 1970 млн. лет (Вредефорт, Южная Африка). Неравномерность распределения кратеров по возрасту отражает таблица 1.4. Данные о возрасте имеются для 120 структур. Большая часть из них принадлежит к относительно молодым образованиям. 51,67% структур имеют возраст менее 100 млн. лет, 64,17% - менее 200 млн. лет, 87,5% - менее 400 млн. лет и 96,6% - менее 600 млн. лет.

Таблица 1.4

Распределение числа кратеров по возрасту

Возраст (млн. лет.)	Число структур	%
< 100	62	51.67
100 - 200	15	12.50
200 - 300	14	11.67
300 - 400	14	11.67
400 - 500	6	5.00
500 - 600	5	4.17
600 - 700	1	0.83
700 - 1000	0	0
1000 - 1100	1	0.83
1100 - 1800	0	0
1800 - 1900	1	0.83
1900 - 2000	1	0.83

(Общее число кратеров = 120)

1.5.4. Связь между размерами и возрастом кратеров.

Распределение кратеров в зависимости от возраста T и размера D показано на рис.1.3. Отсчет времени ведется от настоящего к прошлому.

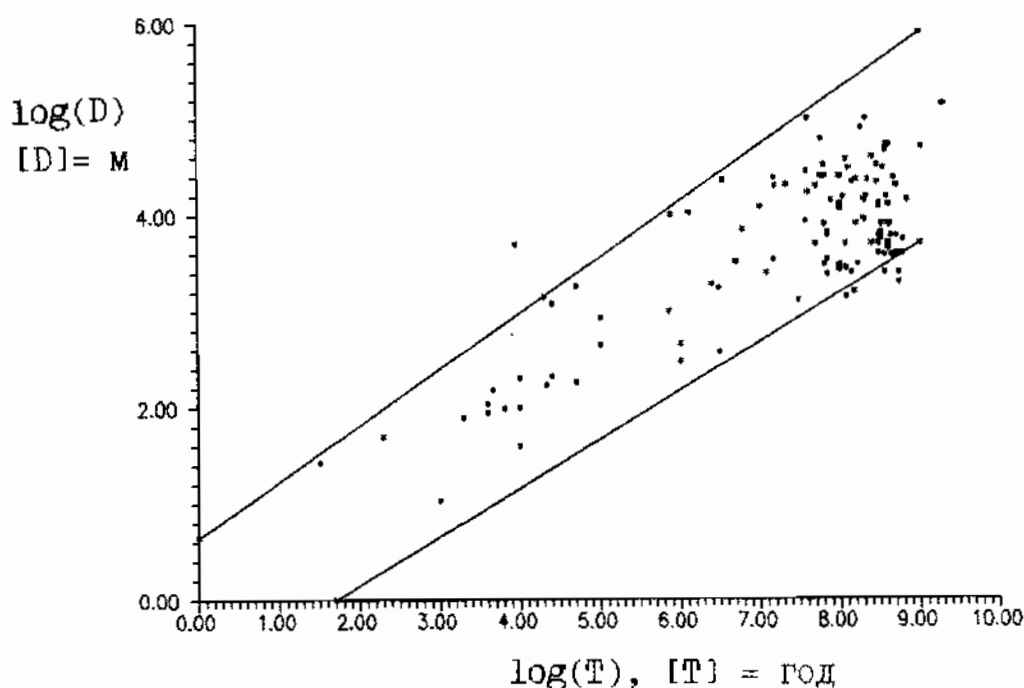


Рис.1.3. Распределение метеоритных кратеров по возрасту T и размерам D .

Наблюдается тенденция к увеличению диаметров кратеров с возрастом. На плоскости $D - T$ наиболее "населенной" является область, в которой выполняется неравенство (см. также [20]):

$$0.1 < \sqrt{T} / D < 10 \quad (1.2)$$

Вероятность встретить кратер за пределами указанной области очень мала. Верхняя прямая (см. рис. I.3) выделяет область малой вероятности появления крупных кратерообразующих метеоритов. Нижняя прямая представляет зависимость продолжительности существования метеоритных кратеров на поверхности Земли (или вернее, время релаксации) как функцию их размеров:

$$T_e \approx (45 - 50) D^2, \quad [D] - \text{метр}, [T_e] - \text{год} \quad (I.3)$$

I.5.5. Уровень сохранности кратеров.

Уровень (степень) сохранности кратеров, как отмечалось в разделе I.2, количественно оценивается в баллах от I до 7 по видимой морфологии кратера и выбросов. Распределение импактных кратеров по степени эрозии представлено в таблице I.5.

В работе [15] показано, что индекс сохранности определяемый отношением диаметра D к его возрасту T , коррелирует с уровнем сохранности (рис. I.4).

Как следует из рис. I.4 для большинства импактных структур значение индекса сохранности больше, чем 0,03. Многие из тех структур, которые имеют более низкий индекс сохранности, относятся к погребенным структурам, либо для них имеются лишь верхние оценки возраста, основанные на возрасте пород мишени. Таким образом, для распознавания вероятных импактных структур с уровнем сохранности 7, не защищенных от эрозии осадочным чехлом, требуется минимальное значение индекса сохранности, приблизительно равное 0,03. Это означает, что земные структуры диаметром 20 км могут быть обнаружены как вероятные импактные, имеющие возраст ~ 600 млн. лет, в то время как структуры диаметром 10 км, если они не защищены от эрозии, будут иметь время жизни только ~ 300 млн. лет.

Таблица 1.5

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР ПО СТЕПЕНИ ЭРОЗИИ

Диаметр (км)	Степень эрозии						
	1	2	3	4	5	6	7
<1	Далгаранга Сихотэ-Алинь Вабар Мораско Каали Хенбери Боксхол Мача Вулф Крик	Хэвиленд Соболевский Амгид Монтураки	Одесса	Ауэлул			
1-5	Метеор Талемцане	Табун-Хара-Обо Зеленогайский Лонар Тенумер Нью-Квебек	Ливерпул Уаркзис Штейнхейм Шунак	Ротмистровский Холефорд Вест Хоук Брент	Мишиногорский Западный Флинн-Крик Кярдла	Б. П. Гусевский Гау Иль Руло	Келли Уэст
5-10	Кефельс	Беенчима- -Салаатинский Вяпрайский	Гоут Пэддок	Ред Уинг	Курский Седерфьерден Уаналитей	Ильинецкий Мизарай Декейтервилл Пайлот Крукид Крик Кутюр	Апхивал Сааксъярви Мин Терновский Тин Бидер Серпент Маунд Мидлсборо Ла Муанери
10-20	Босумтви Калужский	Карлинский Эльгыгытгын	Жаманшин Дип Бэй	Логойский Оболонский		Лалпаярви Оазис Деллен Николсон Сьерра Мадера	Серра-да-Кангала Кентленд Уэлс Крик Янисъярви
20-30		Огтон Хафтон Рис Болтышский	Стин Ривер	Клируотер В. Сент-Мартин Усть-Карский	Каменский Стренгуэйс	Логанча Госес Блаф Мистастин Рошшуар	Консепшен Бэй
30-50	Азуара			Мэнсон	Клируотер З.	Слэйт Арагуайна Шарлевуа Садбери	Карсвелл
50-140			Полигай	Карский Пучеж-Катункский	Луканга Маникуаган		Кограм Сильян Вредефорт

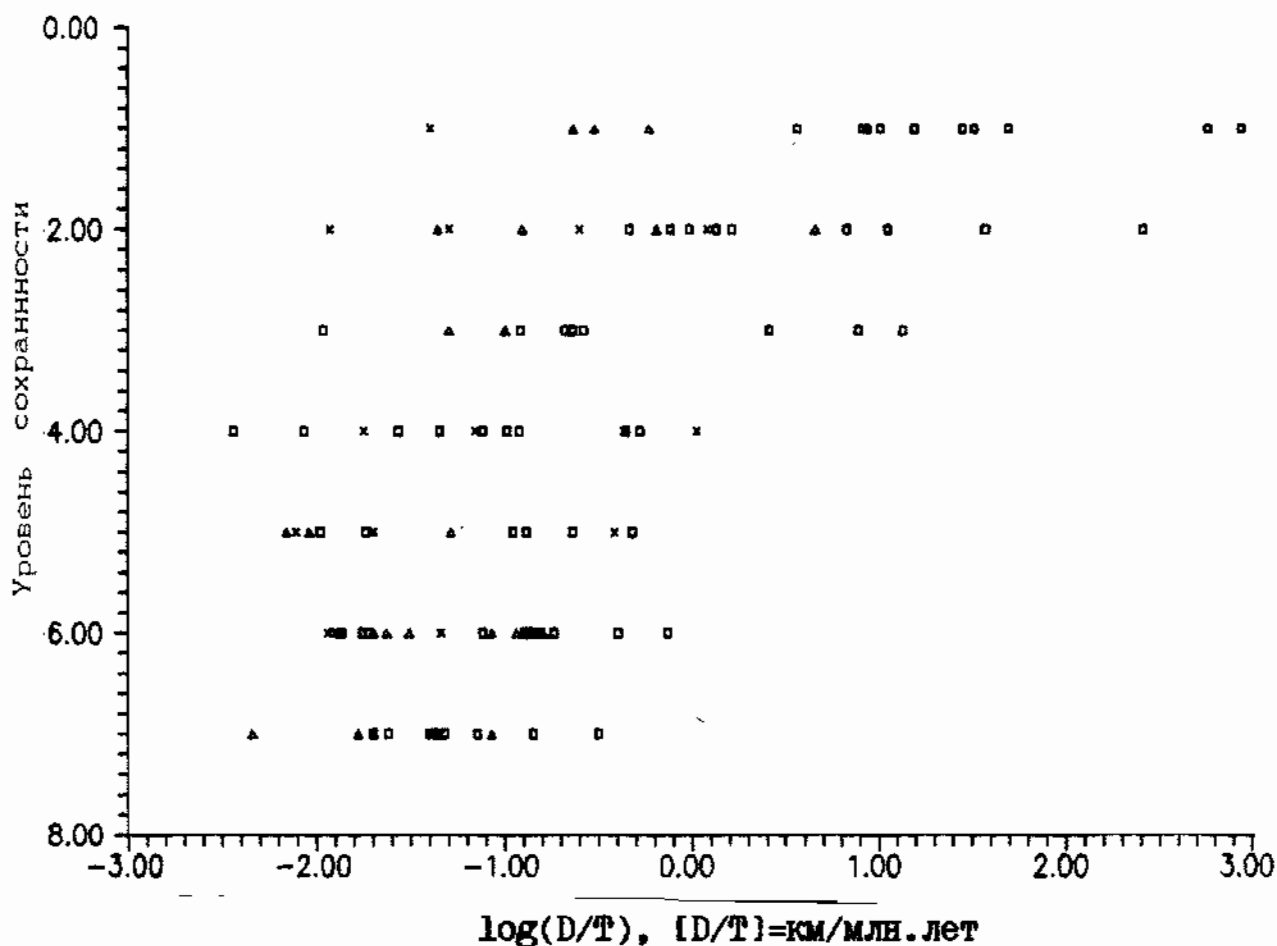


Рис.1.4. Уровень сохранности структур в зависимости от индекса сохранности.

- - хорошо датированные структуры;
- △ - известна лишь верхняя граница возраста;
- x - погребенные структуры.

В работе [4] в качестве параметра, характеризующего степень сохранности или степень выраженности объекта, предложено использовать отношение площади кратера S к его возрасту, т.е. S/T или D^2/T .

Обратная величина T/S или T/D^2 , называемая приведенным возрастом импактного кратера, определяет место его на эволюционной шкале при прочих равных условиях. Например, кратер Попигай диаметром 100 км и возрастом 39 млн.лет, имеющий $T/S = 0,005$ (год/м²), в указанном выше смысле является намного

моложе и сохраннее Сихотэ-Алинского кратера диаметром 27 м, имеющего возраст 34 года ($T/S \approx 0.06$).

Молодые кратеры, т.е. кратеры лучшей сохранности, будут тяготеть к верхней границе области $0.1 < \sqrt{T} / D < 10$ (см. рис. I.3), старые — к нижней.

Вероятность обнаружения кратера согласно [4] определяется как

$$P \sim S_0 / (kT), \quad (I.4)$$

где S_0 — первоначальная площадь кратера, k — коэффициент макроdiffузии.

Грубую оценку k можно получить следующим образом. Если предположить, что вероятность обнаружения известных в настоящее время кратеров примерно одинакова, то из (I.4) следует $k \sim S/T$. Из интегрального распределения числа метеоритных кратеров как функции приведенного возраста T/S , показанного на рис. I.5, видно, что отношения T/S центрируются у значения -0.87 год/м² и имеют разброс около двух порядков. Отсюда среднее значение коэффициента макроdiffузии можно оценить как $k = 1/0.87 = 1.15$ м²/год.

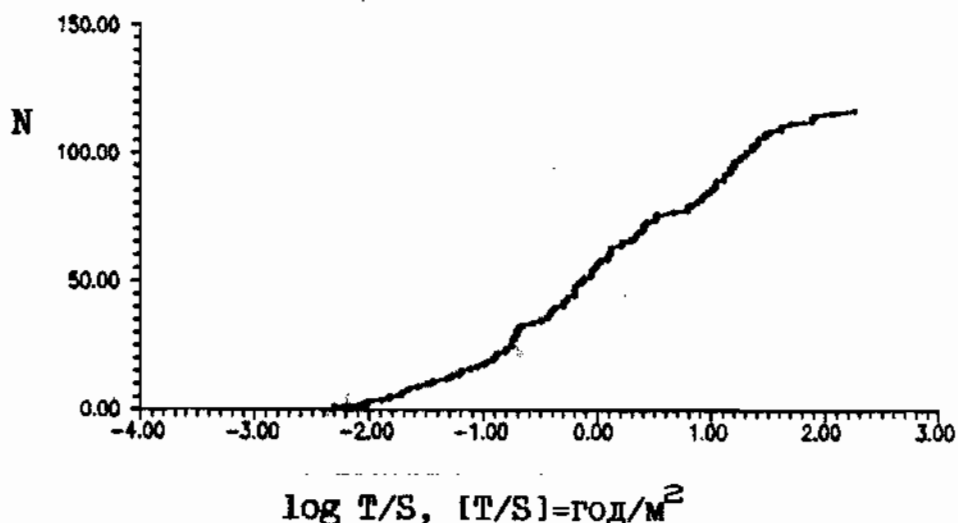


Рис. 1.5. Интегральное распределение числа метеоритных кратеров по приведенному возрасту T/S .

1.5.6. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИМПАКТНЫХ КРАТЕРОВ

Импактные кратеры Земли разделяются на два морфологических класса: 1) простые кратеры, имеющие чашеобразную форму и 2) сложные кратеры, имеющие центральное поднятие (центральную горку) и обрушившийся или депрессивный вал.

В таблице 1.6 приведены некоторые данные о простых импактных структурах. Структуры расположены в порядке возрастания диаметров.

Простые кратеры имеют обычно округлые очертания в плане. Однако, возможно, в зависимости от строения мишени очертания кратера в плане могут варьировать: четырехугольник (Бигач - СССР), многоугольник (Вест Хоук - Канада), неправильная форма (Ауэлул - Мавритания). Причины неправильной формы могут быть связаны со слиянием нескольких кратеров, тектоническими и эрозионными процессами. Простые кратеры имеют диаметр до 2 - 3 км в осадочных породах и до 6 - 8 км в кристаллических.

Сложные кратеры характеризуются центральным поднятием, а с возрастанием размеров (более 3 км в осадочных породах и более 10-12 км в кристаллических) и кольцевыми поднятиями (таб. 1.7). В больших сложных кратерах могут наблюдаться многокольцевые структуры, состоящие из нескольких концентрических поднятий и депрессий (таб. 1.8).

Как следует из таблиц 1.6-1.8 диапазоны размеров кратеров, относящихся к разным морфологическим классам, перекрываются. Возможно, это является следствием влияния на строение кратеров сложного сочетания таких факторов, как размеры и скорость ударяющего тела, геологическое строение и состав мишени.

Морфометрические соотношения для простых кратеров с диаметром меньше, чем 3,8 км в кристаллических породах и диаметром меньше, чем 1,2 км в осадочных породах, имеют вид [15]:

$$h_b = 0,159 * D^{0,829} \quad (1.5)$$

$$h_u = 0,326 * D^{0,786} \quad (1.6)$$

где h_D , h_U - видимая и истинная глубина кратера соответственно, D - диаметр гребня вала (все величины берутся в км).

Сложные кратеры являются относительно неглубокими по сравнению с простыми. Для сложных структур с диаметром, превышающим 4 км в кристаллических породах:

$$h_U = 0,52 * D^{0,189} \quad (I.7)$$

Аналогичное соотношение между видимой глубиной и диаметром кратера в кристаллических породах не удается получить из-за большого разброса в геологических данных.

Для сложных структур с диаметром более 2,5 км в осадочных породах имеем:

$$h_D = 0,204 * D^{0,27} \quad (I.8)$$

$$h_U = 0,14 * D^{0,311} \quad (I.9)$$

Сравнение соотношений (I.7) и (I.9) показывает, что истинная глубина сложных кратеров в осадочных породах меньше, чем в кристаллических.

Принципиальное различие между сложными и простыми кратерами состоит в наличии центрального поднятия, сложенного из глубинных пород, подвергшихся ударному воздействию. Вертикальный подъем пород в центральном ядре поднятия от самого глубокого горизонта оценивается на основе структурного и стратиграфического анализа и дает следующий результат:

$$l_n = 0,06 * D^{1,1} \quad (I.10)$$

Это есть оценка снизу, поскольку не учитывается эрозия, которая уменьшает высоту наблюдаемого подъема.

Для кратера диаметром $D \sim 100$ км $l_n \sim 9,5$ км. Это означает, что значительная часть верхней коры подвержена структурным возмущениям в центре самых больших импактных структур.

Таблица 1.6
Простые импактные структуры

Название структуры	Тип структуры	Мор-фология	Диаметр (км)	Глубина (м)	Тип пород	Степень эрозии	Характер образования	Форма
Хэвиленд	П		0.011		СМ	2		
Далгаранга	П	д в	0.021	4.5	ОС	1	кратер	
Сихотэ-Алинь	П	д в	0.027	6	КР	1	кратер	непр.
Тсырикмяги			0.040					
Соболевский	П		0.050		КР	2		
Вабар	П	д в	0.055	9	ОС	1	кратер	круг, эл.
Илуметса		д в	0.080	12			кратер	непр.
Кампо-дель-Сиело	П	д в	0.090	2.5			кратер	непр.
Мораско	П	д	0.100		ОС	1-2	кратер	
Каали	П	д в	0.110	16	ОС	1	кратер	
Хенбери	П	д в	0.150	18	ОС	1	кратер	круг, эл.
Одесса	П	д в	0.168	5	ОС	3	кратер	
Боксхол	П	д в	0.180	9-16	ОС	1-2	кратер	круг
Меревезер			0.200		КР		кратер	эл.
Эро		д в	0.217	49			кратер	круг
Мача	П		0.300		ОС	1		
Ауэлул	П	д в	0.370	>6	ОС	4	кратер	непр.
Шеневьер			0.400					
Амгид	П	д	0.450		ОС	2	кратер	круг
Монтураки	П	д в	0.460		КР	2	кратер	
Вулф Крик	П	д в	0.850	50	ОС	1	кратер	круг
Дарвин			1.000					
Метеор	П	д в	1.200	180	ОС	1	кратер	непр.
Табун-Хара-Обо	П		1.300		ОС	2		
Зеленогайский	П		1.400		КР	2-3		
Треморжио			1.400					
Ливерпул	П		1.600		ОС	3		
Талемцане	П	д в	1.750		ОС	1-2	кратер	круг
Лонар	П	д в	1.830	120	КР	2	озеро	круг
Тенумер	П	д в	1.900	100	КР	2	кратер	
Холефорд	П	д в	2.000	30	КР	4	кратер	круг
Ротер Камм	П	д в	2.400		СМ		кратер	круг
Келли Уэст	П		2.500		ОС	7		
Мишиногорский	П		2.500		КР	5		
Ротмистровский	П		2.500		КР	4		
Шунак	П		2.500		КР	3		
Вест Хоук	П	д в	2.700		КР	4	озеро	многоуг.
Поплар Бэй	П?		3.000					
Нью-Квебек	П	д в	3.200	360	КР	2	озеро	круг
Брент	П	д в	3.800		КР	4	озеро	круг
Кярдла			4.000		СМ	5		
Скелетон	П		4.000		КР			
Кефельс	П	д	5.000		КР	1	кратер	непр.
Мизарай	П		5.000		КР	6		
Уэтампка	П		6.500		СМ			
Бигач		в	7.000		КР		гео. воз.	4-уг.

Всего 46 структур

Таблица 1.7

Импактные структуры с центральным поднятием

Название структуры	Тип структуры	Мор-фология	Диаметр (км)	Глубина (м)	Тип породы	Степень эрозии	Характер развития	Форма
Б. П.	Ц	цп	2.800		ОС	6		2 кольца
Западный	Ц	цп	3.100		КР	5		
Штейнхейм	Ц	цп кд кп	3.400	80	ОС	3	бассейн	круг
Уаркзис	Ц	кп	3.500		ОС	3		кольцо
Флинн-Крик	Ц	цп кд	3.800		ОС	5	гео. воз.	
Иль Руло	Ц	цп	4.000		КР	6		
Ильинецкий	Ц	цп	4.500		КР	6		
Гау	Ц	цп	5.000		КР	6	озеро	круг
Гоут Пэддок	Ц	цп д	5.000		ОС	3		овал
Курский	Ц	цп	5.000		КР	5		
Сааксьярви	Ц		5.000		КР	7		4-уг.
Мин	Ц	д в	5.000		КР	7	озеро	многоуг.
Седерфьерден	Ц		5.500		КР	5		
Крукид Крик	Ц	цп кд кп	5.600		ОС	6	гео. воз.	круг
Декейтервилл	Ц	цп кд кп	6.000		ОС	6	гео. воз.	
Тин Бидер	Ц	цп	6.000		ОС	7	гео. воз.	3 кольца
Пайлот	Ц	д в	6.000	70	КР	6	озеро	круг
Мидлсборо	Ц	цп кд	6.000		ОС	7	кратер	круг
Гловер Блаф		цп	6.000				гео. воз.	
Серпент Маунд	Ц	цп кд кп	6.400		ОС	7	гео. воз.	круг
Терновский	Ц		8.000		КР	7		
Вяпрайский	Ц		8.000		СМ	2		
Ла Муанери	Ц	в	8.000		КР	7	озеро	круг
Кутюр	Ц	д в	8.000		КР	6	озеро	круг
Уанапитей	Ц		8.500		КР	5	озеро	полукруг
Ред Уинг	Ц		9.000		ОС	4		
Жаманшин	Ц	цп	10.000		ОС	3		кольцо
Босумтви	Ц	д в кд кп	10.500	350	СМ	1	озеро	круг
Оазис	Ц	цп	11.500		ОС	6		круг
Карлинский	Ц	цп	12.000		ОС	2		
Серра-да-Кангала	Ц	цп кп	12.000		СМ	7	бассейн	круг
Дип Бэй	Ц	д в	12.000	340	КР	3	озеро	круг
Николсон	Ц	д в	12.500		КР	6	озеро	овал
Сьерра Мадера	Ц	цп	13.000		ОС	6	кратер	круг
Кентленд	Ц	цп	13.000		ОС	7	гео. воз.	
Лаппаярви	Ц	пик	14.000		КР	6	озеро	овал
Янисъярви	Ц	пик	14.000		СМ	7	озеро	овал
Калужский	Ц	цп	15.000		КР	1		
Оболонский	Ц	цп	15.000		СМ	4		
Деллен	Ц		15.000		КР	6	озеро	круг
Логойский	Ц	цп	17.000		СМ	4		
Логанча	Ц	цп кд кп	20.000		ОС	6		круг
Огтон			20.000		ОС	2	купол	
Госес Блаф	Ц	цп д в	22.000		ОС	6	кратер	кольцо
Клируотер Вост.	Ц	цп кд кп	22.000		КР	4	озеро	круг
Рошшуар	Ц		23.000		КР	6		
Эльгыгьтгын	Ц	цп кп	23.000		КР	2	озеро	4-уг.
Сент-Мартин	Ц		23.000		СМ	4		

Продолжение таблицы 1.7
Импактные структуры с центральным поднятием

Название структуры	Тип структуры	Мор-фология	Диаметр (км)	Глубина (м)	Тип породы	Степень эрозии	Характер разования	Форма
Стренгуэйс	Ц	цп	24.000		СМ	5		
Болтышский	Ц	цп	25.000		КР	2		
Каменский	Ц	цп	25.000		ОС	5		
Стин Ривер	Ц	цп	25.000		СМ	3	гео. воз.	
Мистастин	Ц	цп	28.000		КР	6	озеро	круг
Слэйт	Ц	цп	30.000		СМ	6	остров	
Мэнсон	Ц	цп	32.000		СМ	4	гео. воз.	круг
Карсвелл	Ц	цп кд	37.000		СМ	7	гео. воз.	круг
Шарлевуа	Ц	пик цп кп	46.000		СМ	6	гео. воз.	полукруг
Сильян	Ц	цп кд	52.000		СМ	7	гео. воз.	круг
Карский	Ц	цп д	60.000		ОС	4	залив	
Пучеж-Катункский	Ц	цп	80.000		СМ	4		
Вредефорт	Ц	цп кд кп	140.000		СМ	7	бассейн	кольцо
Всего 62 структуры								

Таблица 1.8
Сложные импактные структуры

Название структуры	Тип-структуры	Мор-фология	Диаметр (км)	Глубина (м)	Тип породы	Степень эрозии	Характер разования	Форма
Гусевский	К		3.000		ОС	6		
Рамгар		пик кп	5.500		КР			кольцо
Беенчиме-Салаат.	?		8.000		ОС	2		
Уэлс Крик	К	цп кд кп	14.000		ОС	7	гео. воз.	эл.
Суавьярви			15.000					
Конселшен Бэй	?		20.000		КР	7		
Хафтон	К	цп кп	20.500		СМ	2	бухта	круг
Рис	К	д кп кд кп кд кп	24.000	61	СМ	2	кратер	эл.
Усть-Карский	?		25.000		ОС	4	залив	полукруг
Азуара	?		30.000		ОС	1		
Клируотер Запад.	К	цп кд кп	32.000		КР	5	озеро	круг
Арагуайна	К	цп в	40.000		СМ	6	купол	круг
Кограм	К	цп	50.000		ОС	7		
Луканга	?		52.000		СМ	5		
Полигай	К	цп	100.000		СМ	3	кратер	круг
Маникуаган	К	цп кд	100.000		СМ	5	озеро	круг
Садбери	К?		140.000		КР	6	озеро	эл.
Всего 17 структур								

Обозначения: П-простая чашеобразная форма, Ц-структуры с центральным поднятием, К-кольцевые структуры;
д-депрессия, в-вал, кп-кольцевое поднятие, кд-кольцевая депрессия, цп-центральное поднятие;
ОС-осадочные, КР-кристаллические, СМ-смешанные породы;
гео. воз. - геологическое возмущение; эл. - эллипс;

1.5.7. О ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ ИМПАКТНЫХ КРАТЕРОВ

При рассмотрении крупных земных импактных кратеров и астроблем Масайтис ввел понятие о структурно - литологических комплексах земных кратеров. Эти комплексы имеют свое внутреннее строение, различаются по составу пород и обычно отделяются друг от друга четкими поверхностями раздела. Масайтис предложил выделить пять комплексов: 1) цокольный, сложенный породами мишени; 2) коптогенный, включающий перемещенные (аллогенные) брекчии и импактиты; 3) заполняющий, представленный различными осадочными породами, залегающими в чаше кратера; 4) перекрывающий - это толщи осадочных или вулканических пород, которые лежат выше заполняющего комплекса; 5) инъекционный, представляющий магматические породы, внедрившиеся в глубинные части кратера, или наложенные образования, связанные с воздействием термальных вод.

Различие между простыми чашеобразными кратерами и сложными кратерами, имеющими центральное или кольцевое поднятие, обусловлено особенностями их глубинного строения. Наибольший интерес с точки зрения генезиса имеют соотношения первых двух комплексов. Структурно - литологические комплексы не включены в число признаков импактных структур в силу плохой откартированности и изученности (в частности, мало данных по буровым и геофизическим исследованиям) многих кратеров Земли.

1.5.8. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР

Воздействие мощной ударной волны, образующейся при высокоскоростном ударе, вызывает заметные изменения в физических свойствах пород в обширной зоне, окружающей кратер. Изменяется плотность пород, которая в линзе образовавшейся брекчии меньше по сравнению с ненарушенными коренными породами. Изменяются магнитные свойства пород, что выражается в уменьшении их остаточной намагниченности и нарушении магнитной поляризации вследствие смешивания фрагментов, в приобре-

тении остаточной намагниченности при остывании значительного объема частично и полностью расплавленных пород в крупных кратерах. Развивается система трещин, которая приводит к нарушению монолитности пород и ухудшает контакты между частями. В результате изменяются скорость сейсмических волн, упругие свойства пород и их электрическое сопротивление.

Аномалии плотности, намагниченности, упругих свойств и электропроводности пород в зоне кратера позволяют использовать для изучения космогенных структур методы разведочной геофизики – гравиметрию, магнитометрию, сейсморазведку и электроразведку. По магнитному и гравитационному полям можно построить сетку разломов и трещин, образующих радиально-кольцевую систему, далеко выходящую за пределы кратера.

С помощью комплекса геофизических методов могут быть установлены тектоническая обстановка в районе падения метеорита, изменения физических свойств пород с глубиной и внутренняя структура кратера.

Геофизические методы особенно важны для распознавания космогенных структур, лишенных морфологических признаков и погребенных под толщами осадков.

1.5.8.1. ГРАВИТАЦИОННЫЕ АНОМАЛИИ

С увеличением размеров и мощности линзы низкоплотной брекчии возрастает недостаток силы тяжести под метеоритным кратером. С увеличением размеров структуры амплитуда отрицательной гравитационной аномалии Δg возрастает от 0,25 мГал для кратеров диаметром $D \sim 1$ км до 25–30 мГал для образований диаметром 90–100 км. Интенсивная гравитационная аномалия является результатом уменьшения плотности пород (дробления и брекчирования). Например, разности плотностей между окружающей породой и раздробленным материалом в кратерах Вест Хоук и Холефорд (Канада) составляют 0,33 г/см³ и 0,16 г/см³ соответственно.

На рис. 1.6 показана зависимость $\Delta g(D)$ для метеоритных кратеров и вулканических кальдер.

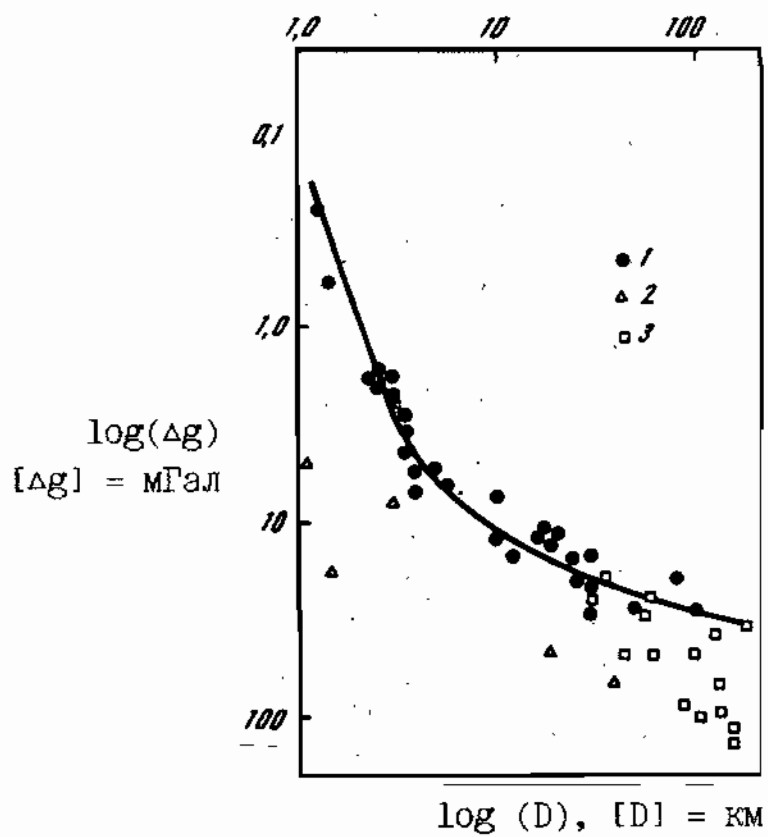


Рис. 1.6. Зависимость амплитуды аномалии силы тяжести от размеров структуры.
 1 - метеоритные кратеры Земли;
 2 - вулканические кальдеры;
 3 - лунные кратеры;

Гравитационные аномалии импактных структур, не подвергшихся интенсивной эрозии, тектоническим движениям и т.п. обычно имеют округлую в плане форму, причем наиболее четко они проявляются в кратерах средних размеров (Дип Бэй, Уанапитей - Канада).

Над кратером Холефорд ($D = 2$ км) наблюдается простая кольцевая аномалия с амплитудой около 2 мГал. Кратер Карсвелл ($D = 37$ км) отмечен кольцевой аномалией с амплитудой около 10 мГал и относительным максимумом в центре. Имеющиеся данные о гравитационных аномалиях импактных структур см. в таб. I.9.

По краям метеоритных кратеров наблюдается кольцо локальных знакопеременных аномалий, например, это видно в наблюдаемом поле у структуры Рис и в поле остаточных аномалий силы тяжести у структуры Уанапитей.

С увеличением размеров структуры картина поля усложняется. В центральной части появляется положительная аномалия (таб. I.10), которая связана с последующим поднятием глубинных масс в центральной области.

Вообще, в крупных сложных кратерах гравитационная аномалия маскируется следующими факторами: 1) центральным поднятием, сложенным породами с высокой плотностью (Клируотер Зап. - Канада); 2) эрозией (Николсон) и 3) региональными вариациями гравитации (Карсвелл, Маникуаган - Канада).

Для крупных кратеров размером более 50 км ярко выраженной гравитационной аномалии может не наблюдаться (например, Садбери), так как здесь велика гетерогенность мишени, и аномалии в большой мере отражают гравитационный эффект блоковой структуры земной коры в районе падения метеорита. Критерий гравитационной аномалии для крупных структур может терять свою диагностическую определенность.

Таблица 1.9

Имеющиеся данные
о гравитационных аномалиях импактных структур

Название структуры	Диаметр структуры (км)	Гравитационные аномалии (мГал)
Метеор	1.200	-0.6
Зеленогайский	1.400	-
Лонар, 2 шт.	1.830	-3.6
Холефорд	2.000	-2
Ротер Камм	2.400	-9.3
Мишиногорский	2.500	-
Шунак	2.500	-5
Вест Хоук	2.700	-6.6
Поплар Бэй	3.000	-7
Нью-Квебек	3.200	-6
Брент	3.800	-4.5
Кярдла	4.000	-
Скелетон	4.000	-3.3
Гау	5.000	-3
Курский	5.000	-
Мизарай	5.000	-
Седерфьерден	5.500	-6
Бигач	7.000	-
Уанапитей	8.500	-15
Жаманшин	10.000	-6
Босумтви	10.500	-
Дип Бэй	12.000	-16
Кентленд	13.000	-1
Сьерра Мадера	13.000	-
Лаппаярви	14.000	-10
Уэлс Крик, 4 шт.	14.000	-6
Янисьярви	14.000	-13
Оболонский	15.000	-
Суавьярви	15.000	-8
Логойский	17.000	-
Хафтон	20.500	-11
Госес Блаф	22.000	-3
Клируотер Восточный	22.000	-13
Рошшуар	23.000	-10
Эльгыгытгын	23.000	-12
Рис	24.000	-20
Клируотер Западный	32.000	-16
Мэнсон	32.000	-?
Карсвелл	37.000	-10
Карский	60.000	-20-25
Пучеж-Катункский	80.000	-
Полигай	100.000	-30
Всего 42 структуры		

Таблица 1.10

Геофизические характеристики некоторых ударных кратеров Земли

Кратер	Гравитационное поле							Магнитное поле	
	$D_{га}$ (км)	Харак. аном.	$(\Delta g)_{max}$ мГал	$M_{a_{12}}$ 10^{12} кг	Z_a км	$(\Delta g)^+$ мГал	$d_{га}^+$ км	Харак. аном.	$D_{ма}$ км
Шунак	2,5	округ. отриц.	-5	0,26±0,31	0,4			пониж. на 20 -30γ	3
Янисъярви	14	отриц.	-13	51,5	2,5			пониж. на 100γ, кольцо полож. аном.	20 -30
Эльгьгыггын	23	отриц. с полож. в центре	-12	40	2,8	+1,5	2-3	пониж. на 100 -500γ	>10
Карский	60	отриц. с полож. в центре	-20±25	600	3,7	+13	поли- гонал. форма 14	общее пониж., слож.	60
Попигай	100	отриц. с полож. внутрен. кольцом	-30	1500				слож. аном. поле, кольцо локал. аном.	100

Обозначения:

- $D_{га}$ - поперечник гравитационной аномалии;
 $(\Delta g)_{\max}$ - максимальная амплитуда Δg в пределах кратера;
 M_a - дефектная масса;
 Z_a - глубина центра тяжести дефектной массы;
 $(\Delta g)^+$ - амплитуда центральной положительной аномалии;
 $d_{га}^+$ - поперечник центральной положительной аномалии;
 $D_{ма}$ - поперечник магнитной аномалии.

Характерным признаком гравитационных аномалий метеоритных кратеров является быстрое затухание их амплитуды при пересчете на высоту (рис. I.7), что связано с бескорневой структурой этих кратеров. В этом состоит их резкое отличие от вулканических структур, корни которых уходят на несколько километров в глубину.

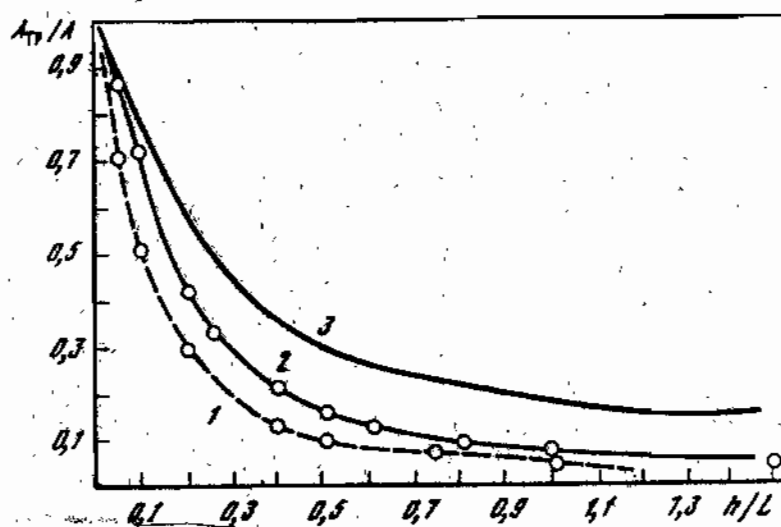


Рис. I.7. Изменение амплитуды аномалии с пересчетом на высоту
 1 - кратер Рис; 2 - Уанапитей; 3 - неметеоритные структуры; A - амплитуда аномалии смлы тяжести;
 $A_{тр}$ - амплитуда аномалии после пересчета; h - высота пересчета; L - ширина аномалии

Гравитационные аномалии позволяют рассчитать такие важные параметры, как глубина центра аномальных масс Z_a и ее отношение к диаметру кратера D , а также дефектную (недостающую) аномальную массу M_a . Зависимости этих величин от диаметра кратера показаны на рис. I.8.

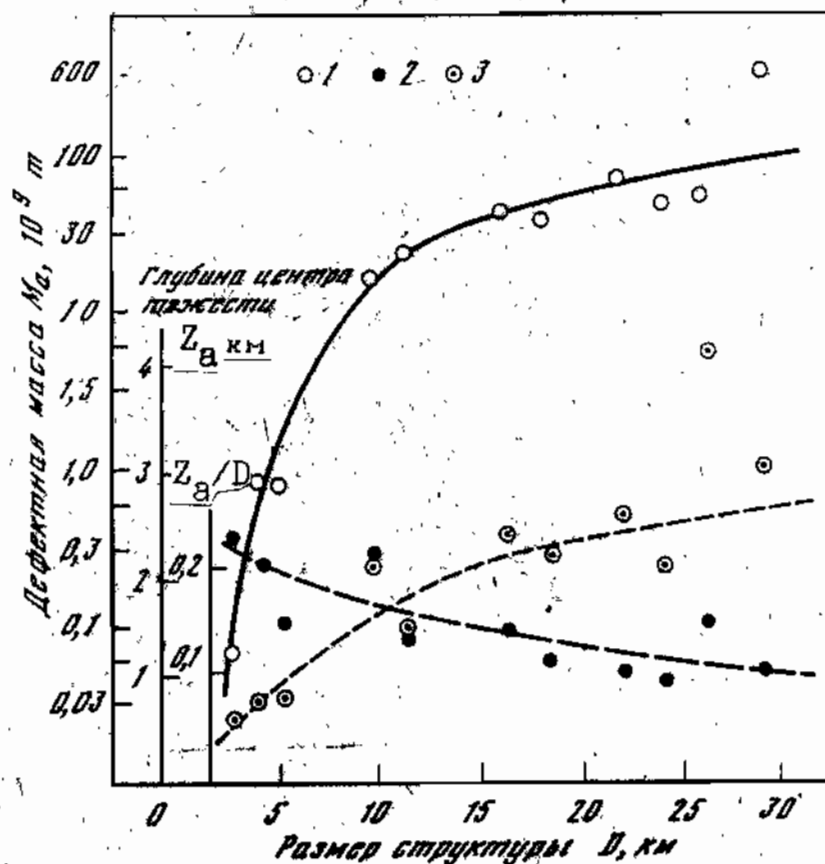


Рис. I.8. Зависимость параметров метеоритных кратеров от их размеров

1 - кривая зависимости дефектной массы (M_a) от размеров (D); 2 - кривая зависимости глубины до центра тяжести (Z_a) от размеров (D); 3 - кривая зависимости отношения Z_a/D от размеров (D);

Аномальные массы, рассчитанные для II метеоритных структур [21], сведены в таблицу I.II.

С увеличением размеров структуры дефектная масса увеличивается. Например, для кратера Brent (Канада) размером 3,6 км, Калужской структуры (СССР) размером 16 км и кратера Рис (ФРГ) размером 24 км дефект массы оценивается соответственно $0,92 \cdot 10^9$; $43,6 \cdot 10^9$ и $62,1 \cdot 10^9$ т. Однако для структур больших размеров рост дефекта массы не наблюдается (см. например, Янисьярви, Клируотер 3.). Возможно это связано с быстрой релаксацией больших кратеров.

Дефектная масса обусловлена количеством выброшенного с некоторой площади вещества земной коры. Вычисленные значения дефектной массы занижены из-за неучета эрозии кратера или заполнения его осадками, а также возможных процессов восстановления. Из таблицы I.II видно, что масса метеорита M_1 , образовавшего кратер намного меньше массы выброшенного вещества (в 10^2 - 10^4 раз). Эта разница уменьшается с увеличением размеров кратера, что связано с его восстановлением.

Дефектная масса имеет пластинообразную или линзообразную форму. Ее центр тяжести располагается неглубоко (на глубине 0,5-4,2 км). Отношение глубины центра тяжести к диаметру кратера составляет $Z_a / D \sim 0,25-0,1$ и уменьшается при увеличении размеров структуры. Например, для кратера Brent ($D=3,6$ км), Калужской структуры ($D=16$ км), кратера Рис ($D=24$ км) отношения Z_a / D соответственно равны 0,25; 0,15; 0,1. Это обстоятельство связано с тем, что зона разуплотнения под кратером (по мере увеличения его диаметра) растет в большей степени в боковом направлении, чем в глубину, и указывает на ограниченную глубину проникновения взрыва. Аналогичная картина наблюдается для отношения глубины кратера к его размерам.

Заметим, что отношение глубины центра тяжести гравитационной массы к диаметру эндогенных кольцевых структур лежит в пределах 0,5 - 1.

Почти для всех метеоритных кратеров характерно понижение плотности в пределах зоны брекчированных и раздробленных пород в среднем от 0,04 до 0,06 г/см³.

Дефектная поверхностная плотность, равная отношению

Таблица I. II

Количественные параметры метеоритных структур

Структура	D км	Δg мГал	M_a 10^9 т	Z_a км	Z_a/D	M_a/S 10^5 г/см ²	$\Delta \rho$ г/см ³	M_1 т
Холефорд	2.5	1.8-2	0.07	<0.6	0.24	0.016	>0.066	10^3-10^4
Брент	3.6	4.5	0.92	0.75	0.21	0.09	0.06	10^5
Вест Хоук	5.0	6.6	0.8	0.8	0.16	0.041	0.026	10^5-10^6
Уанапитей	9.6	13	17.0	2.1	0.22	0.234	0.05	10^6
Дип Бэй	11-12	16	21.0	1.5	0.14	0.181	0.06	10^6
Калужская	16	12	43.6	2.4	0.15	0.208	0.043	10^6-10^7
Клируотер В.	18	13	37.7	2.2	0.12	0.149	0.034	10^7
Рис	20-24	20	62.1	2.1	0.10	0.164	0.046	10^7
Янисъярви	20-23	12	51.5	2.6	0.11	0.164	0.031	10^7
Болтышская	26	30	312.0	4.2	0.16	0.44	0.05	10^7
Клируотер З.	28-30	16	48.1	3.1	0.11	0.078	0.13	10^7-10^8

Обозначения:

- D - размер структуры;
- Δg - амплитуда отрицательной аномалии силы тяжести;
- M_a - дефектная масса;
- Z_a - глубина центра тяжести дефектной массы;
- Z_a/D - отношение глубины центра тяжести к диаметру;
- M_a/S - отношение значения дефектной массы к площади;
- $\Delta \rho$ - дефицит плотности в пределах кратера;
- M_1 - приблизительная масса метеорита, образовавшего кратер;

M_a/S , где S - площадь гравитационной аномалии над метеоритным кратером, физически отражает количество раздробленной массы, приходящейся на единицу площади. Если исключить из рассмотрения структуры Холефорд и Болтышскую, то для остальных 9 структур таблицы I.II значения отношения M_a/S изменяются в пределах $(0,078-0,24) \cdot 10^5$ г/см², в то время как их размеры изменяются от 3,6 км. до 30 км. Это означает, что несмотря на значительное увеличение энергии, выделяемой при выпадении на Землю небесных тел с более крупными размерами или более высокими скоростями, удельная плотность энергии, работающей на выброс, остается примерно постоянной.

Обратим внимание на ориентировочный характер некоторых оценок, приведенных в таблице I.II. Они отличаются от оценок, полученных другими авторами. Например, в работе [22] для кратера Холефорд указаны значения $M_a = 0,34 \cdot 10^9$ т, $M_a/S = 0,08$, а в работе [23] для структуры Рис - $M_a = 74 \cdot 10^9$ т, $M_a/S = 0,0195$. Подчеркнем, что наличие гравитационной аномалии является диагностическим признаком при выделении космогенных структур средних размеров, не подвергшихся сильной эрозии.

I.5.8.2. МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ.

Характерной особенностью астроблем является понижение в их окрестности общего фона магнитного поля. Например, интенсивность магнитной аномалии для кратера Метеор равна 20 γ , а кратера Брент - 160 γ . Наблюдаются магнитные аномалии для кратеров Жаманшин, Карский в СССР, а также для кратера Карсвелл в Канаде, для кратера Рис в ФРГ и др. Имеющиеся данные о магнитных аномалиях импактных структур приведены в таб. I.12.

Таблица I.12

*Имеющиеся данные
о магнитных аномалиях импактных структур*

Название структуры	Диаметр структуры (км)	Магнитные аномалии (γ)
Эро, 5 шт.	0.217	-
Метеор	1.200	-20
Мишиногорский	2.500	-
Шунак	2.500	-20+30
Поплар Бэй	3.000	-
Брент	3.800	-160
Кярдла	4.000	-
Скелетон	4.000	-
Беенчиме-Салаатинский	8.000	+ -
Жаманшин	10.000	-
Босумтви	10.500	-?
Дип Бэй	12.000	*
Кентленд	13.000	*
Сьерра Мадера	13.000	*
Уэлс Крик, 4 шт.	14.000	-
Янисъярви	14.000	-100
Суавъярви	15.000	-
Логанча	20.000	-
Эльгыгытгын	23.000	-100+500
Рис	24.000	-300
Карсвелл	37.000	-
Луканга	52.000	-
Карский	60.000	+ -
Попигай	100.000	-

Всего 24 структуры

Для очень крупных структур (диаметром более 50 км) магнитное поле, так же как и гравитационное, усложняется. Наблюдаются пониженные и пестрые поля с резко выраженными аномалиями в центральной части структуры. Поскольку направление остаточной намагниченности пород отражает направление вектора геомагнитного поля в месте и в момент падения метеорита, это дает возможность определить возраст кратера по палеомагнитной шкале. Так, например, в центре кратера Рис имеются обширные поля отрицательных магнитных аномалий до 300 γ . Направление вектора остаточной намагниченности в зювитах соответствует направлению геомагнитного поля во время образования этого кратера - 15 млн. лет тому назад.

У импактных кратеров хорошей сохранности магнитные аномалии повторяют круглые очертания кратеров. Над глубоко эродированной структурой Янисъярви очертания аномалии не столь четки, однако видны не только общая магнитная аномалия, но и выделяется центральное поднятие.

Некоторые метеоритные структуры почти не отражаются в магнитном поле, например, Калужская, Болтышская или Каали, либо отражаются слабо, например, кратер Уэлс Крик. Это может быть связано с тем, что кратер образовался в немагнитных породах или кратерная структура перекрыта отложениями осадков.

Магнитные аномалии обнаруживают приповерхностный бескорневой характер, быстро затухая по высоте. Для сравнительно небольших структур этот признак является также диагностическим.

1.5.8.3. СЕЙСМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТЕОРИТНЫХ КРАТЕРОВ

Несколько кратеров (Дип Бэй, Рис, Каали, Метеор, Госес Блафф, Брент) изучены сейсморазведкой, в основном методом преломленных волн. Сейсмический метод позволяет: 1) выделить границы между коренными и заполняющими кратер осадочными породами; 2) определить скоростные параметры пород, слагающих и заполняющих кратер; 3) установить размеры зоны нарушенных пород,

окружающих кратер.

Сейсмические исследования метеоритных кратеров показывают: 1) снижение граничных и пластовых скоростей сейсмических волн к центру структуры не только в породах, заполняющих кратер, но и в подстилающих породах; 2) сложную волновую картину, потери корреляции волн на границе кратера; 3) появление диффигированных волн; 4) размеры зоны пониженных скоростей в два раза превосходят видимые размеры кратера.

Для кратера Дип Бэй отмечено снижение скорости сейсмических волн с 6,1 до 4,6 км/сек в раздробленной линзовой брекчии под дном кратера и в его окрестностях по сравнению с ненарушенными породами.

В кратере Рис скорость уменьшается к центру кратера в породах, заполняющих кратер (от 2,7 до 1,7 км/сек), и в подстилающих породах (от 5 до 3,5 км/сек). Отмечается сложная волновая картина, особенно на границе кратера.

На кратере Каали отмечается понижение граничной скорости с 2,8 до 1,7 км/сек на нижней границе и с 2,2 до 1,4 км/сек на верхней преломляющей границе, ухудшение корреляции опорной волны на границе нарушенных и ненарушенных пород.

На кратере Метеор во внешней зоне за пределами кратера скорость сейсмических волн уменьшается от периферии к центру кратера: на южной стороне — с 2,7 до 1,9 км/сек, на западной — с 3,0 до 2,0 км/сек, на северной с 3,0 до 1,9 км/сек, на восточной — с 2,6 до 1,8 км/сек. Скорость в центральной части кратера меньше, чем на валу и постепенно увеличивается с глубиной. Установлено, что зона дробления на кратере Метеор имеет вид воронки, вложенной в основание пологой блюдцевидной выемки. Сейсмическими исследованиями такая же картина установлена на кратере Госес Блаф.

На кратере Брент зафиксировано снижение скорости сейсмических волн на 30 % в слое, простирающемся на 1,2 км от видимых границ кратера, диаметр которого равен 3,8 км. Размеры зоны пониженных скоростей почти в два раза превосходят видимые размеры кратера.

1.5.8.4. ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Для метеоритных кратеров характерны: 1) наличие линзы низкоомных пород, связанных с зоной дробления и насыщением этой зоны водными растворами; 2) наличие горизонтальных геоэлектрических границ в пределах кратера; 3) затухание электромагнитных волн в области кратера; 4) размеры зоны аномальных сопротивлений превосходят видимые размеры кратера.

В центральной части метеоритного кратера Холефорд по данным вертикального электрического зондирования выделены осадки мощностью 130–200 м с электрическим сопротивлением 1000–3000 Ом·м.

На кратере Рис электрическое сопротивление пород брекчии составляет 20 Ом·м, коренные ненарушенные породы имеют сопротивление 150–300 Ом·м. По результатам электроразведки выделяется внутренний подземный вал структуры.

Истинные размеры зоны нарушенных пород в кратере Кентленд были выявлены по положительным аномалиям напряженности поля с помощью высокочастотной электроразведки.

В западной и восточных частях кратера Уанапитей по данным о затухании вторичных наведенных электромагнитных полей были обнаружены кратерный вал в форме погребенного полукольцевого хребта.

Результаты электроразведки на главном кратере Каали показали изменение сопротивления с глубиной: для сильно раздробленных доломитов – 130–140 Ом·м, для слабо нарушенных и ненарушенных пород – более 300–400 Ом·м. Было установлено, что зона дробления (250 м) значительно больше видимого размера кратера (100 м).

1.5.9. ГЕОЛОГО – ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ

В центральной части импактных структур диаметром от 4 до 7 км зафиксированы выступы (центральные поднятия) более древних пород. Встречаются центральные поднятия, имеющие бло-

ковое строение, например, в структуре Логанча, в которой породы залегают под углом от 30 до 30°. В более мелких кратерах центральное поднятие отсутствует.

Днища импактных структур, в том числе и центральное поднятие, сложены преимущественно аутигенными и аллогенными брекчиями.

Геологическим признаком, позволяющим диагностировать импактные структуры, является их бескорневой характер по сравнению с эндогенными структурами. Это проявляется в быстром затухании зоны дробления и разуплотнения пород под кратером. Глубина затухания этой зоны в импактных кратерах всегда меньше диаметра и у самых крупных кратеров не превышает 5 - 7 км (при диаметре в десятки км).

Бескорневой характер импактных структур проявляется и в составе ксенолитов в породах, возникших из расплава. В расплавных импактитах описываются многочисленные ксенолиты вмещающих пород, т.е. пород, затронутых процессом дробления. Однако в таких структурах не обнаружены фрагменты материала, слагающего земную кору ниже зоны дробления. В то же время они обычно представлены в ксенолитах, встречающихся в вулканических лавах, кимберлитах, трубках взрыва.

1.5.10. ОСТАТКИ МЕТЕОРИТНОГО ВЕЩЕСТВА

Бесспорным признаком идентификации метеоритных кратеров являются остатки метеоритного вещества, которое было найдено в трех формах: в виде обломков метеоритов (железные, железокаменные, каменные); в виде переплавленного метеоритного вещества (сферулы железно-никелевого состава, специфические изменения в породах мишени, прожилки, содержащие железо, хром, никель, кремний, кальций в раздробленных породах) и в рассеянной геохимической форме.

Метеоритное вещество обнаружено лишь в 48 кратерах (таб. I.13). Распределение импактных структур по виду метеоритного вещества приведено в таблице I.14.

Таблица 1.13

Импактные структуры с присутствием метеоритного вещества

Название структуры	Диаметр (км)	Метеоритное в-во
Хэвиленд	0.011	ж-к
Далгаранга	0.021	ж
Сихотэ-Алинь, 122 шт.	0.027	ж
Соболевский	0.050	(ж) а
Кампо-дель-Сиело, 20 шт.	0.090	ж
Вабар, 4 шт.	0.097	ж (ж) [ж]
Мораско, 8 шт.	0.100	ж
Каали, 8 шт.	0.110	ж
Хенбери, 13 шт.	0.150	ж (ж) [ж] а
Одесса, 5 шт.	0.168	ж
Боксхол	0.180	ж
Мача, 5 шт.	0.300	ж
Ауэлул	0.370	к (к) [к]
Шеневьер	0.400	ж
Монтураки	0.460	ж (ж)
Вулф Крик	0.850	ж
Дарвин	1.000	(ж)
Метеор	1.200	ж (ж) [ж]
Табун-Хара-Обо	1.300	?
Лонар, 2 шт.	1.830	[ж]
Брент	3.800	[к] а
Ильинецкий	4.500	[ж] а
Гау	5.000	[ж]
Мин	5.000	[+]
Сааксьярви	5.000	[ж-к]
Рамгар	5.500	ж (ж)
Вяпрайский	8.000	(+)
Терновский	8.000	(к)
Уанапитей	8.500	[к]
Жаманшин	10.000	[к]
Босумтви	10.500	(ж) [ж]
Николсон	12.500	[к]
Лаппаярви	14.000	[к]
Оболонский	15.000	[+] ж
Клируотер Восточный	22.000	(к) [к] а
Рошшуар	23.000	(к) [к]
Эльгыгытгын	23.000	[к] а
Рис	24.000	(к) [к] а
Стренгуэйс	24.000	[?] (+)
Болтышский	25.000	[к] а
Каменский	25.000	(+) [к]
Усть-Карский	25.000	[к]
Мистастин	28.000	[к]
Карсвелл	37.000	[к]
Карский	60.000	[к]
Маникуаган	100.000	[к]
Попигай	100.000	(к) [к]
Садбери	140.000	а

Всего 48 структур

Обозначения:

ж - остатки железных,

ж-к - железо-каменных,

к - каменных метеоритных тел.

Буквы без скобок соответствуют наличию обломков метеоритов, в круглых скобках - продуктов их плавления в виде сферул и других образований, в квадратных скобках - распыленного метеоритного вещества.

а - аномальное содержание Ni, Co.

? - данные требуют уточнения.

Таблица I.14

**Распределение импактных структур по виду
метеоритного вещества**

	осколки	расплав	распыленное вещество
железные	16	8	7
каменные	1	6	18
железо-каменные	1	0	1
аномальное содержание Ni, Co		9	

Фрагменты железных метеоритов найдены в кратерах Боксхол, Вульф Крик, Хенбери (Австралия), Вабар, Рамгар, Сихоте-Алинь, Соболевский (Азия), Метеор, Одесса (Северная Америка), Кампо-дель-Сиело, Монтураки (Южная Америка), Каали, Шеневьер (Европа). Они представляют собой обломки массой от нескольких грамм до сотен килограмм, сохраняющиеся в небольших кратерах, диаметр которых, как правило, не превышает 1 км.

Сферулы (в расплавных импактитах) и прожилки в (брекчиях), представляющие сплавы железа, обогащенные хромом, никелем, кобальтом, платиной, иридием были найдены в кратерах Попигай, Рис, Рошшуар, Клируотер Восточный и др.

В большинстве случаев присутствие метеоритного вещества проявляется в резком обогащении импактного расплава такими редкими элементами, как никель, иридий и т.п. Например, ниже приведено содержание никеля в расплавленных импактитах (А) и в породах мишени (В) (в 10^{-4} %) для четырех кратеров:

	Брент (Канада)	Клируотер Вост. (Канада)	Эльгыгытгын (СССР)	Карский (СССР)
(А)	115-600	830	16	181
(В)	5-21	0,5-34	7	93

Сидерофильные элементы (такие как никель, платина, иридий, кобальт) характерны для железных ядер планет, а не для их коры, поскольку в процессе формирования планеты происходит миграция этих элементов в ядро. Таким образом, сидерофильные элементы находятся в малых концентрациях в вулканических и других породах, составляющих земную кору. Это не распространяется на древние астероиды и кометы, которые образовались независимо от планет.

Высокая концентрация сидерофильных элементов в расплавленных породах является диагностическим признаком метеоритного удара.

1.5.II. КОНУСЫ РАЗРУШЕНИЯ

Одним из характерных макроскопических результатов прохождения ударной волны через горную породу являются конусы разрушения. Это конусовидные образования с бороздчатой поверхностью, углом при вершине от 15° до 120° и высотой от нескольких см до 15 м. Заостренность конусов зависит от физико-механических свойств породы. Угол при вершине больше в плотных, крепких, массивных, относительно грубозернистых породах (граниты, диориты, крупнозернистые песчаники) и меньше в мягких мелкозернистых (известняки, кварциты).

Конусы разрушения известны в 66 кратерах (см. рис. I.9). Они описаны на структуре Садбери - Канада, в бассейнах Рис, Штенхейм - ФРГ, в районах Сьерра-Мадера, Флинн-Крик - США, Госес Блафф - Австралия.

Полевые наблюдения и экспериментальные данные показали, что конусы разрушения возникают при встрече ударной волны с поверхностями раздела (границы пластов, трещин и т.п.) в диапазоне ударных давлений 20-100 кбар. Конусы разрушения своими вершинами обращены к центру структуры (Уэлс Крик - США, Слейт - Канада) и / или от него.

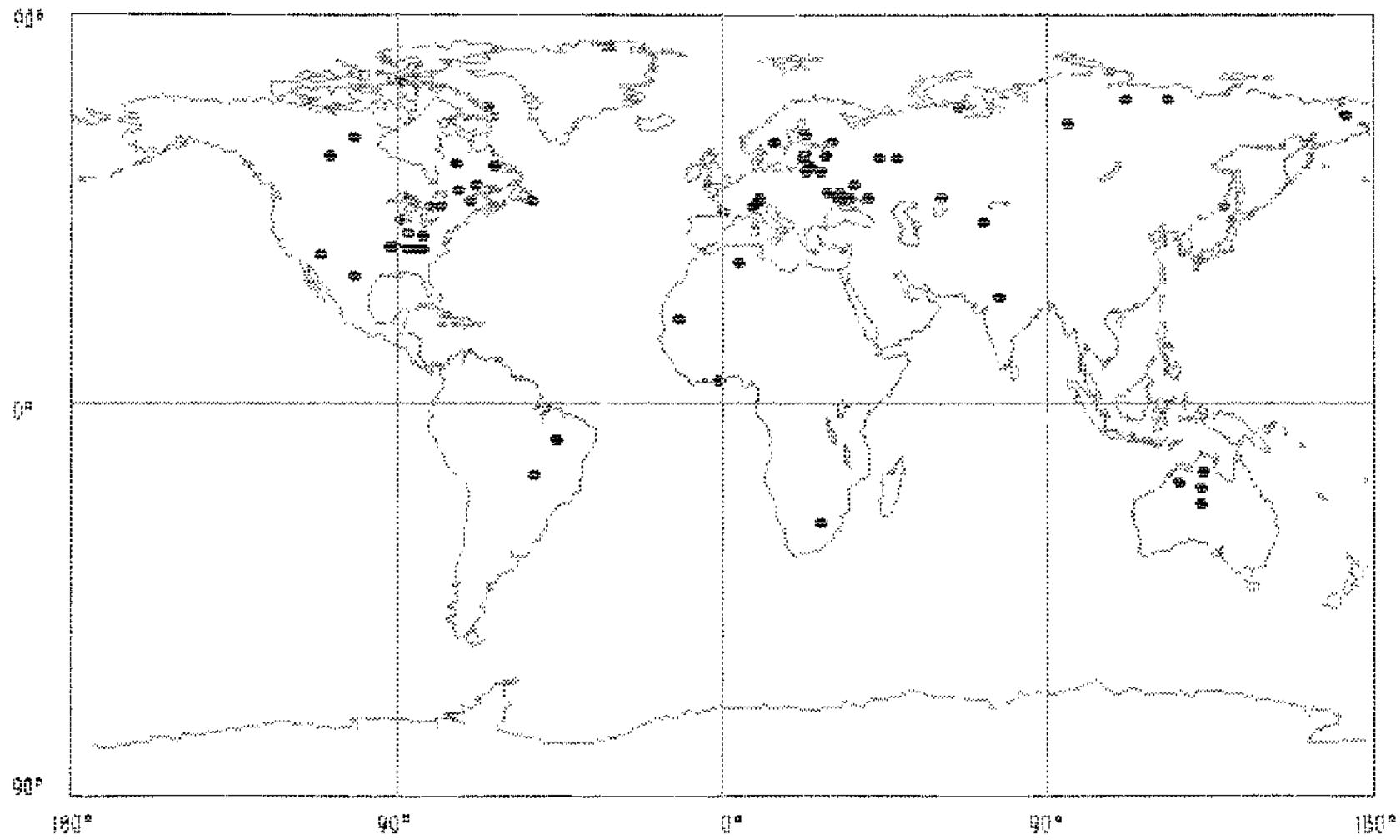


Рис. I.9. Геофизическое распределение импактных структур Земли с обнаруженными конусами разрушения.

В глубоко эродированных структурах конусы разрушения могут быть ориентированы не только на ее центр, но и вверх, а также и в других направлениях (Госес Блаф – Австралия), поскольку после образования испытали перемещения. В этих случаях ориентировка конусов разрушения может быть использована для оценки степени эрозии структур после их образования.

1.5.12. ПРИЗНАКИ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Ударная волна, распространяясь от точки соударения метеорита с мишенью и постепенно затухая, производит значительную работу по нагреву, деформации, разрушению горных пород и экскавации материала из самой впадины кратера. Высокие давления на фронте волны сжатия, достигающие нескольких мегабар, следующая за ней волна разгрузки и остаточная температура (до 2000–3000 °С) вызывают ряд преобразований в минералах и горных породах от слабо проявленной трещиноватости до полного плавления и испарения. Признаки таких изменений горных пород и минералов (признаки ударного метаморфизма) установлены в небольших по размеру кратерах с остатками метеоритного вещества, но особенно они характерны для крупных по размерам древних импактных структур, где выделялась значительная энергия при ударе космического тела.

Ударный метаморфизм проявляется в пластических деформациях, фазовых переходах, разложении или плавлении пород. При этом одновременно происходят значительное перемещение и перемешивание материала, подвергающегося сжатию и ударному нагреву. В зависимости от ударной нагрузки и послееударного нагрева отмечено несколько ступеней ударного метаморфизма, хорошо диагностируемых по поведению кварца и полевых шпатов. Д.Штоффлер выделяет шесть таких ступеней – от нулевой до пятой включительно ([25]).

Нулевая ступень ($p < 100$ кбар, $T < 100$ °С) характеризуется развитием трещиноватости в кварце и полевых шпатах.

Первая ступень ($100 < p < 350$ кбар, $100 < T < 300$ °С)

отличается появлением планарных элементов, т.е. системы особым образом ориентированных трещин или включений. Минералы с планарными элементами или другими оптическими и иными признаками пластических деформаций называются диаплектовыми.

На второй ступени ($350 < p < 450$ кбар, $300 < T < 900$ °С) минералы без плавления переходят в так называемые диаплектовые стекла, при этом сохраняется первичная морфология зерен. Возникают и различные высокобарические полиморфные модификации (коэсит, стишовит и др.)

На третьей ступени ($450 < p < 550 - 600$ кбар, $900 < T < 1300 - 1500$ °С) по полевым шпатам возникают мономинеральные стекла плавления, имеющие пузырчатую текстуру.

На четвертой ступени ($550 - 600 < p < 900$ кбар, $1300 - 1500 < T < 3000$ °С) происходит полное плавление пород и возникают смешанные полиминеральные стекла.

На пятой ступени ($p > 900$ кбар, $T > 3000$ °С) происходит испарение силикатов.

После прохождения волны сжатия и подъема температуры происходит охлаждение минералов в условиях быстрого спада давления. В зависимости от режима охлаждения, минералы (в том числе диаплектовые), диаплектовые стекла и стекла плавления в той или иной степени подвергаются соответственно перекристаллизации, рекристаллизации и кристаллизации. Метастабильные высокобарические фазы переходят в более устойчивые модификации. Многие свойства минералов, импактитов и взрывных брекчий, а также высокобарические минералы являются минералогическими признаками ударных процессов.

Воздействием ударной волны на породы определяются следующие характерные признаки погребенных метеоритных кратеров:

- 1) округлая в плане форма и характерный поперечный профиль;
- 2) специфическая картина искажений магнитного и гравиметрического полей;
- 3) понижение сейсмических скоростей и наличие пород с аномальными низкоомными сопротивлениями;
- 4) наличие взрывных брекчий и стеклосодержащих пород туфоподоб-

- ного и (или) лавоподобного вида;
- 5) конусы разрушения;
- 6) диаплектовые минералы с планарными элементами, с пониженным двупреломлением (вплоть до полной изотропизации) и другими специфическими изменениями;
- 7) высокобарные фазы: коэсит (описан в 27 кратерах), стишовит (в 10 кратерах) и др;
- 8) диаплектовые стекла минералов и пород, образующиеся без плавления и потому полностью сохраняющие макро и микротекстурные особенности исходных пород;
- 9) неизохимический характер ударных расплавов и продуктов их застывания относительно пород мишени и неравновесный характер кристаллизации этих расплавов;
- 10) затухание ударной волны от поверхности в глубь Земли.

I.5.13. ВЗРЫВНЫЕ БРЕКЧИИ И ИМПАКТИТЫ

Образования коптогенного комплекса разными авторами расчленяются по-разному. Одни исследователи выделяют импактиты (породы полностью или частично состоящие из продуктов застывания ударных расплавов) и взрывные брекчии, например, [26], используя для этого механизм формирования и особенности геохимических связей между элементами. Другие авторы, подчеркивая общность источника энергии, затрачиваемой на формирование пород, предлагают все породы коптогенного комплекса считать импактными [5]. В настоящей работе принята последняя точка зрения.

Импактиты могут быть разделены по месту залегания пород относительно места их образования (аутигенные, т.е. неподвижные образования; аллогенные, т.е. перемещенные образования), по степени ударно-метаморфического преобразования (дробление различной степени интенсивности, ударное плавление), наличию (или отсутствию) перемешивания вещества, по величине обломков, характеру раскристаллизации расплава.

В составе аутигенной брекчии в зависимости от степени

разрушения могут различаться брекчированные породы: горная мука, щебенчатая, глыбовая брекчии, мегабрекчия, катаклазиты, возникающие по более плотным кристаллическим породам. Для брекчий по осадочным породам характерны цементные текстуры. Среди аллогенных брекчий выделяются контокластиты, щебенчатые брекчии, глыбовые брекчии, мегабрекчии и клипшеновые брекчии.

Импактиты являются результатом плавления преимущественно кристаллических горных пород. Массивные импактиты (тагамиты) подразделяются по степени раскристаллизации стекла и характеру его соотношений с включениями, отражающими физико-химические условия образования и кристаллизации импактного расплава. Среди обломочных импактитов (зювитов) выделяются различные литолого-петрографические типы в зависимости от количественных соотношений обломков стекол, пород и минералов.

В таблице I.15 приведены признаки ударного метаморфизма для II6 структур из базы данных для достоверных импактных структур Земли. Подробная расшифровка соответствующих полей дана в пункте I.4.

Таблица 1.15

Признаки ударного метаморфизма в импактных структурах

Название структуры	Диаметр (км)	Конусы разрушения	Диаплектовый минерал и стекло	Высоко-барическая фаза	Импактиты и брекчии
Сихотэ-Алинь	0.027				ат
Соболевский	0.050	+		+	ал
Кампо-дель-Сиело	0.090				ал
Вабар	0.097		кварц пс	кс	ал с
Мораско	0.100		гф		
Каали	0.110	>0.02	д		ат с
Хенбери	0.150				ат с
Одесса	0.168				ал ат
Мача	0.300		кварц	ст?	ал?
Ауэлул	0.370	+	ц л бд		ал с
Шеневьер	0.400				ал
Амгид	0.450		кварц		ал
Монтураки	0.460		кварц пшп би ап л пс	кс	ат ал с
Вулф Крик	0.850		д		ат ал
Дарвин	1.000		л	кс	с
Метеор	1.200	+	кварц пс	кс ст	ал ат с
Табун-Хара-Обо	1.300		кварц		ат ал с?
Зеленогайский	1.400	0.05	д кварц пшп би ап	+	ат ал и
Треморжио	1.400	>0.5	кварц пл		ат?
Ливерпул	1.600		кварц		ал
Талемцане	1.750	+	кварц	кс	ат ал
Лонар	1.830		пшп п		ат ал с
Тенумер	1.900		кварц пшп би л с ап		т с
Холефорд	2.000		кварц пшп пс	кс	ал с
Ротер Камм	2.400		кварц		ат?
Келли Уэст	2.500	0.1	кварц		ат
Мишиногорский	2.500	0.1	д кварц пшп би	+	ат ал с
Ротмистровский	2.500		д кварц пшп би	+	ат ал с з
Шунак	2.500	+	д кварц		ат ал с
Вест Хоук	2.700		кварц пс		ат ал с
Б. П.	2.800		кварц бд		ат с
Гусевский	3.000				ат ал
Поплар Бэй	3.000				ал ат
Западный	3.100		кварц пшп би гр	кс	ат ал с т з
Нью-Квебек	3.200		кварц пс		т?
Штейнхейм	3.400	0.30	кварц		ат ал
Уаркзис	3.500		кварц		ат
Брент	3.800	+	кварц пшп д пс		ат ал т
Флинн-Крик	3.800	+	пс		ал
Иль Руло	4.000	+	кварц		ал

Продолжение таблицы 1.15.

Признаки ударного метаморфизма в импактных структурах

Название структуры	Диаметр (км)	Конусы разрушения	Диалектовый минерал и стекло	Высоко-барическая фаза	Импактиты и брекчии
Кярдла	4.000	+	д		ат ал
Скелетон	4.000				ат
Ильинецкий	4.500	+	д кварц пшп би гр	кс	ат ал с з т
Апхивал	5.000		кварц		ат ал
Гау	5.000		кварц пшп би		ал с т
Гоут Пэддок	5.000	+	кварц		ат ал с
Кефельс	5.000	+	кварц пшп сл л пс		с б
Курский	5.000	+	д кварц пшп		ат ал
Мизарай	5.000	+	д кварц пшп би ап ц		ат с
Мин	5.000		пс и. кварца	кс	с б
Сааксъярви	5.000		кварц пшп би		ал с т
Рамгар	5.500	+			ат
Седерфьерден	5.500		кварц пшп би л?		ат ал з?
Крукид Крик	5.600	0.1	кварц		ат ал
Гловер Блаф	6.000	0.09	кварц?		ат с
Декейтервилл	6.000	+			ал з
Мидлсборо	6.000	+	кварц пс		ал
Пайлот	6.000		кварц пшп би пс		ал с
Тин Бидер	6.000		кварц		ат
Серпент Маунд	6.400	+		кс	
Уэтампка	6.500		кварц пшп би		ал
Бигач	7.000				ат ал
Беенчима-Салаатин.	8.000	0.1			ат ал
Вяпрайский	8.000	0.03	кварц		ат ал
Кутюр	8.000		кварц би д пс		ал т
Ла Муанери	8.000		кварц		ал т
Терновский	8.000	0.2	кварц л ц	кс ст	ат ал т
Уаналитей	8.500		кварц пшп би ро п эп	кс	ал с
Жаманшин	10.000	0.1	д кварц л	кс ст м	и ат ал с
Босумтви	10.500	0.1	ц и	кс	ат ал з с
Оазис	11.500		кварц ц т		з с
Дип Бэй	12.000		кварц пшп би пс		с б
Карлинский	12.000	+			ал
Серра-да-Кангала	12.000	>0.1			ат с
Николсон	12.500	+	кварц пшп би пс		ал с
Кентленд	13.000	15.0	кварц	кс	ат ал
Сьерра Мадера	13.000	>0.5	кварц пс		ат ал
Лаппаярви	14.000	+	кварц пшп би гф	кс	ал т
Уэлс Крик	14.000	+			ат ал
Янисъярви	14.000	0.2	д кварц пл ствр би гр	кс ст	ал т з

Продолжение таблицы 1.15

Признаки ударного метаморфизма в импактных структурах

Название структуры	Диаметр (км)	Конусы разрушения	Диаплектовый минерал и стекло	Высокобарическая фаза	Импактиты и брекчии
Деллен	15.000		кварц		т
Калужский	15.000		д кварц пшп би		ат ал с з т
Оболонский	15.000	0.05	д кварц пшп би гр	+	ат ал с з
Суавьярви	15.000		кварц гф		ал т?
Логойский	17.000	+	д кварц пшп би гл	кс ст	ат ал с т
Консепшен Бэй	20.000	0.5	кварц му хл		ат? ал т с
Логанча	20.000	0.2	пшп		ат ал
Хафтон	20.500	0.3	кварц пшп би сил ка	кс	ат ал с
Госес Блаф	22.000	1-1.5	кварц		ат ал з
Клируотер Вост.	22.000	+	кварц пшп	+	ал
Рошшуар	23.000	+	кварц би		ат ал с т з
Сент-Мартин	23.000		кварц пшп ро л би		ал т
Эльгыгытгын	23.000	+	кварц л пшп би	кс ст	ал с
Рис	24.000	+	кварц би пшп крд ро пс	кс ст у	ат ал с з
Стренгуэйс	24.000	+	кварц пшп		ат ал с
Болтышский	25.000	+	д кварц пшп би гр л	кс	ат ал с т з
Каменский	25.000	0.07	кварц	кс	ат ал с
Стин Ривер	25.000		кварц пшп би пс		с з б
Усть-Карский	25.000	+	кварц л пшп		ат ал с т з
Мистастин	28.000	+	кварц пшп		т с
Азуара	30.000		кварц би		ал
Слэйт	30.000	0.3	кварц пшп ка		ат ал т
Клируотер Зап.	32.000	+	кварц пшп п би		ат ал т
Мэнсон	32.000		кварц пс		ат ал
Карсвелл	37.000	0.20	кварц би гр ап пс		ат ал т с
Арагуайна	40.000	<0.25	кварц пшп би му		ат з с
Шарлевуа	46.000	1.0	кварц пшп би		ат т с
Кограм	50.000		кв пшп п с гф		ат ал т
Луканга	52.000		кварц		ал с
Сильян	52.000	0.50	кварц		ал т
Карский	60.000	1.0	д кв л пшп п ро ап с	кс	ат ал с т з
Пучеж-Катунк.	80.000	+	д кварц пшп би ро	кс?	ат ал с з
Маникуаган	100.000	0.25	пшп би гр п ро пс и. кварца		ал ат т с
Полигай	100.000	0.15	д кв пшп би п гр крд с ап ц гф	кс ст	ат ал т с з ат ал т с з
Вредефорт	140.000	1.2	кварц пс	кс ст	ат ал с т
Садбери	140.000	3	кварц би пшп пс		ат т з

Всего 116 структур

Обозначения приведены в п. 1.4

1.6. О КРАТЕРНЫХ ПОЛЯХ И ПАРНЫХ КРАТЕРАХ ЗЕМЛИ

В каталог импактных структур включены данные о 14 кратерных полях (группах кратеров). Количество кратеров в поле изменяется от 2-х до 122-х, например, Хенбери в Австралии - $n=13$, $D=150$ м; Каали в Эстонии - $n=8$, $D=110$ м; Мача в Якутии - $n=5$; $D=300$ м; Одесса в США - 5, $D=168$ м; Сихотэ-Алинь - $n=122$, $D=27$ м и другие, где n - число кратеров в группе, D - диаметр максимального кратера. В каталог включены параметры лишь наибольшего из кратеров. Таким образом, именно кратер наибольшего диаметра представляет все кратерное поле. При рассмотрении вопросов, связанных с мощностью и частотой космических ударов, возможно, что космическое событие, приведшее к образованию кратерного поля, более правильно характеризовать не диаметром наибольшего из кратеров поля, а некоторым эффективным диаметром кратера таких размеров, для образования которого потребовалась бы мощность удара, равная суммарной мощности, выделяемой при образовании всех кратеров рассматриваемого кратерного поля.

На поверхности Земли можно выделить несколько пар крупных, сближенных кратеров. Например, Карский ($D=60$ км) и Усть-Карский ($D=25$ км) на побережье Карского моря с расстоянием между ними 5 км, Каменский ($D=25$ км) и Гусевский ($D=3$ км) в Приазовье с расстоянием между ними 1,4 км, Оазис ($D=11,5$ км) и БП ($D=2,8$) в Ливии с расстоянием между ними 80 км, Клируотер Западный ($D=32$ км) и Клируотер Восточный ($D=22$ км) в Канаде, Рис ($D=24$ км) и Штенкейм ($D=3,4$ км) в ФРГ. Судя по геологической и изотопной датировке кратеры каждой из пар были образованы почти одновременным ударом двух отдельных метеоритов.

Если парные кратеры образовались в результате выпадения на Землю контактно-бинарных внеземных тел, то следовало бы, как и выше, внести корректировку в оценки мощности и частоты космических ударов.

Примером бинарного внеземного тела является обнаружен-

ный с помощью радарных наблюдений [27] астероид 1989 PB с нерегулярной и невыпуклой поверхностью, который пролетел около Земли на расстоянии, равном II расстояниям от Земли до Луны. Он состоял из двух различных частей, находящихся в контакте. Возможно такие контактно-бинарные объекты являются результатом соударения с низкими скоростями двух внеземных тел и слияния их.

Масайтис [28] высказал соображения о групповом выпадении внеземных тел на Землю, имеющих пологую траекторию, что обеспечило значительное распыление вещества при полете в высоких широтах. Распад отдельных крупных тел мог происходить как при их приближении к Земле, так и в высоких слоях атмосферы. Масайтис предположил, что Карский и Усть-Карский, Каменский и Гусевский кратеры являются результатом почти одновременного выпадения четырех космических тел, образовавших эти две пары кратеров. Это предположение основано не только на совпадении датировки этих объектов, но и на совпадении линий, соединяющих центры кратеров в обеих группах, с линией дуги, соединяющей по кратчайшему расстоянию на поверхности Земли обе группы кратеров. Эту линию можно рассматривать как проекцию плоскости орбиты предполагаемого роя выпавших тел.

Заметим, что, во-первых, некоторые крупные кратеры окружены большим количеством мелких кратеров. Например, множество мелких кратеров наблюдается вокруг воронки кратера Жаманшин ($D=5-6$ км) в радиусе 10 км от центра. Во-вторых, вокруг некоторых астроблем были обнаружены вторичные кратеры, образованные падением обломков, выбитых из основного крупного кратера. Например, в районе Болтышской астроблемы ($D=25$ км) выявлено 6 вторичных кратеров диаметром от 0,5 до 1 км. Они расположены на расстоянии от 27 до 37,5 км, т.е. в среднем на расстоянии $2,3 D$ диаметра кратера. Такие ситуации в каталоге импактных структур не отражены.

I.7. КРАТКИЙ ОБЗОР КАТАЛОГА ПРЕДПОЛАГАЕМЫХ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ

Каталог предполагаемых импактных структур включает 110 наименований и 22 поля для характеристики каждой структуры. Данные о структурах неполные. Даже координаты их центров определены только для 80-ти из них. Распределение этих структур по континентам показано на рис. I.10. Представление об их относительных размерах дает рис. I.11, на котором три окружности с наибольшими диаметрами изображают структуры Настапока, Залив Святого Лаврентия в Северной Америке и Землю Уилкса в Антарктиде с размерами 440, 290, 240 км соответственно.

Большие неопределенности имеются в отношении возраста структур. Он указан всего лишь для 36-ти структур, причем для 8-ми из них дается только геологический период. Среди 28-ми структур, для которых указаны численные значения возраста, 8-мь из них содержат только верхние оценки его.

Описание полей БД имеет ту же структуру, что и для достоверных импактных кратеров (см. раздел I.4).

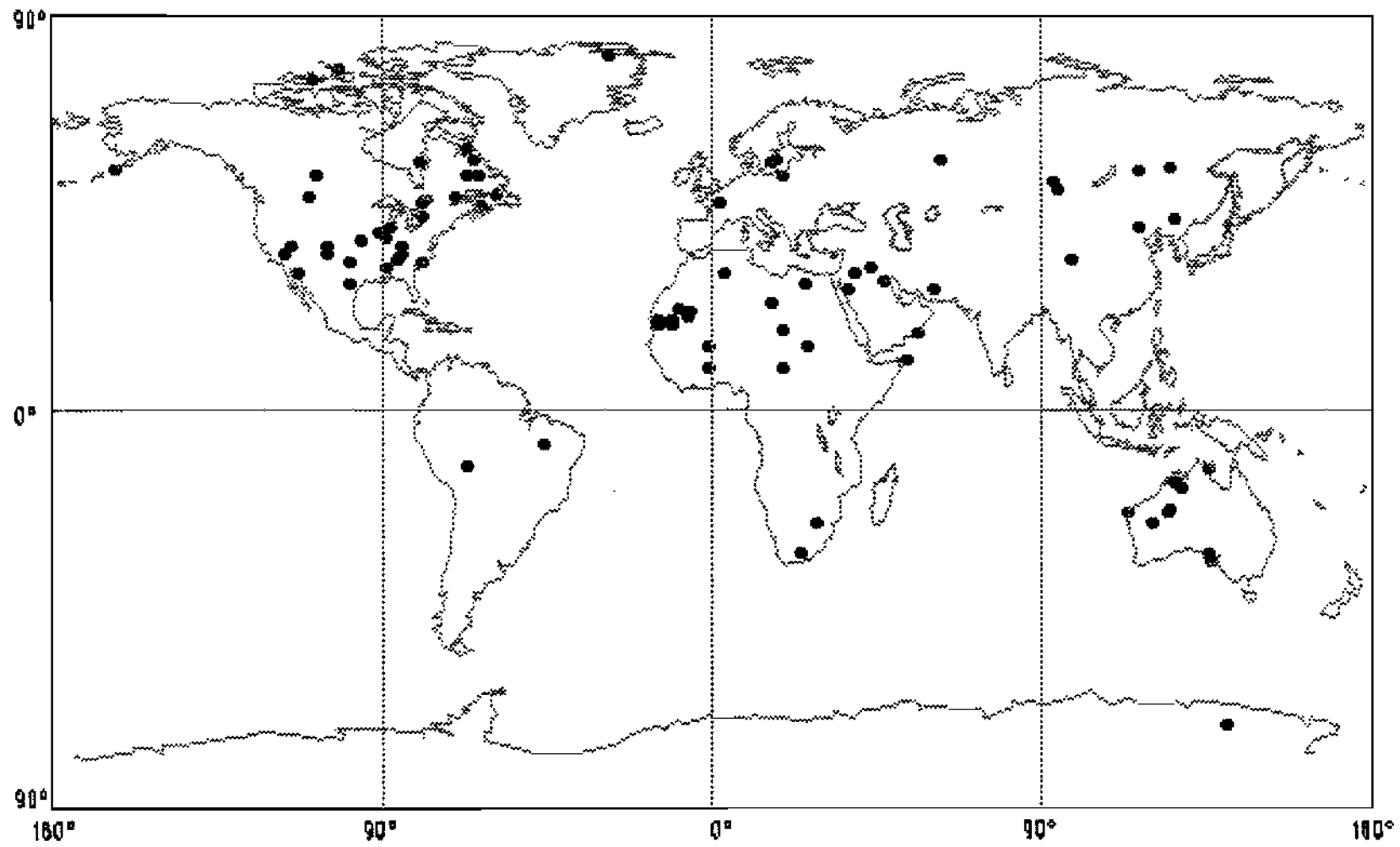


Рис. I.10. Предполагаемые импактные структуры Земли

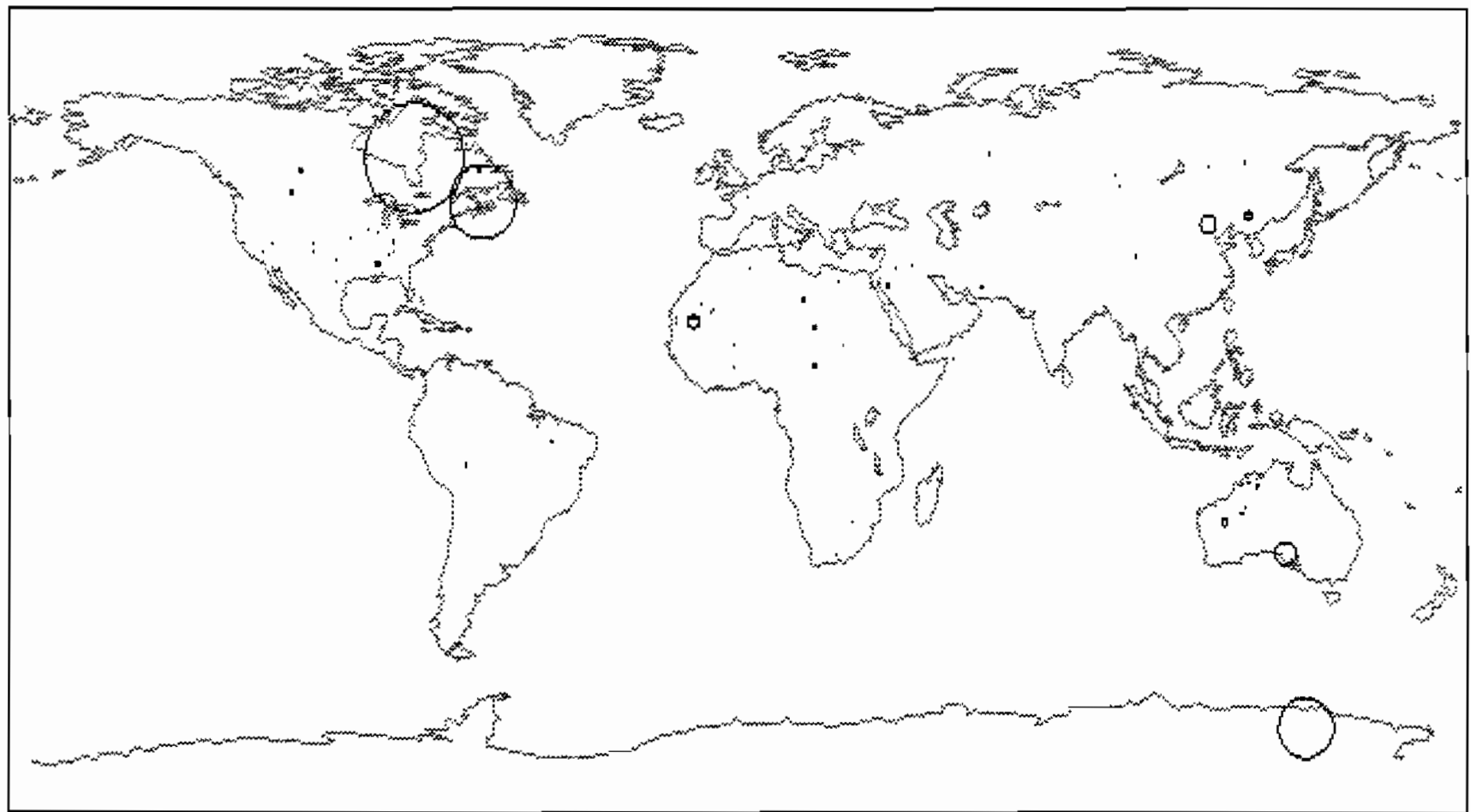


Рис. I. II. Относительные размеры предполагаемых импактных структур Земли.

КАТАЛОГ ПРЕДОЛАГАЕМЫХ И НЕАКТИВНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ

Название структур, к-во объектов	Часть света	Страна местоположение	Координаты		Возраст (млн лет)	Диаметр (км)	Диаметр центра- ла (км)	Гау- бунд (м)	Тип по- ро- ди- ни-	Приме- че- ния	Сте- пень эро- зии	Тип струк- тур	Морфология	Мете- орит- ное в-во	Кон- ное руше- ние и сте- кло	Дриа- дек- то- вые и сте- кло	Высо- ко- ко- те- сти и сте- кло	Ион- о- ва- ри- ан- ты и сте- кло	Аномалии гра- ди- ент- ные	Харак- тер образо- вания	Форма	Вид с орбиты Земли
			Широта	Долгота																		
Аорунга, Aorungua	Ю	Чад	19 06с	19 15в		12.000 (6)			ВУ	0.000		К	ца							кратер	кольца	хороший
Агнейр, Agnejr	Ю	Нидерланды	20 с	15 з						0.000		Д								кратер		
Акроном, Acronom	Ю	Австралия	32 01в	136 26в	600	90.000			КР	0.074		Д								кратер	б-ти уг.	хороший
Аль Мадатин, Al Madati	Ю	Саудовская Аравия	28 40с	37 11в	6360	6.000			ОС	10.00		Д								кратер	кольца	хороший
Альн, Aln	Ю	США, Алабамские о-ва	35 94с	163 09з		0.065			45	0.000		Д	в							кратер	кольца	
Антикиленд, Antikenland	Ю	Австралия, Сев. Терр.	13 10в	136 40в						0.000		Д								кратер		
Багдад, Baghdad, 2 шт.	Ю	Ирак	33 с	43 в						0.000		Д								кратер		
Байбусунская (Хатинчатская)	Ю	СССР			КЗ	0.480				ВУ	0.000									кратер		+
Байрачская	Ю	СССР			51	20.000				0.142										кратер		+
Балхаская	Ю	СССР			С1(?)					ВУ	0.000									кратер		+
Басра, Basra	Ю	Ирак	30 20с	47 40с						0.000		Д								кратер		
Бей Блаф, Bee Bluf	Ю	США, Техас	29 02с	99 51з	< 40	2.400				ОС	6.944	2	П							кратер		
Боденское	Ю	ФРГ								0.000												
Борин	Ю	СССР				0.200				0.000					1?							
Вивер, Veivers	Ю	Австралия	22 58в	125 22в	< 450	0.080				10312												
Винфельдсбург, Wipfelds-burg	Ю	Вост. Германия			14.8					0.000												
Галлюеден, Galluedes	Ю	Нидерланды	21 00с	15 40з						0.000										кратер		
Гарет-за-Лейет, Garet El-Leiet	Ю	Ливия	25 00с	16 30в		4.000				0.000		кратер								кратер		
Гармук, Garmukh	Ю	Ирак	28 30с	60 40с		0.045		15		0.000		Д								кратер	кольца	
Гарсфорд, Garsford	Ю	США, Мэриленд	40 22с	89 40з		4.000				0.000		П?	ца							гео. воз.	кольца	
Гурма, Gorma, 20 шт.	Ю	Ирак	15 17с	1 19з		0.200		3		0.000		Д								кратер		
Д'Аалу	Ю	Ливия				5.000				0.000		Д										
Дайнес, Dyces	Ю	США, Теннесси	36 22с	85 45з	Ниж. кембрий					0.000		П?								гео. воз.	кольца	
Даквотер, Dacwater	Ю	США, Невада	38 07с	115 07з		0.070		4.5		0.000		Д								кратер	кольца	
Дес-Плейнс, Des Plaines	Ю	США, Мэриленд	42 15с	88 45з						0.000		С	ца	ка	ка					гео. воз.		
Делта Ноб, Delta Nob	Ю	США, Канзас	38 06с	95 06з	350	3.500				28.51		С	ца	ка	ка					гео. воз.		
Дескэнзганский	Ю	СССР				100.000				0.000		С										
Догубузид, Dogubuzid	Ю	Турция			0.000056	0.035				0.046												
Доуни, Down	Ю	Китай	42 03с	116 16в		129+-3				70.000		К	ца							кратер	2 кольца	
Эйбуу, Eibuu	Ю	Канада			70-80	8.000				1.034												
Эван-Тоб	Ю	СССР				15.000				0.000												
Зв. св. Лаврентия, Gulf of St. Lawrence	Ю	Канада	47 06с	63 03з		290.000		6000		0.000		Д								кольца	кольца	
Земля Уинкса, Wilkes Land	Ю	Антарктида	71 ю	140 в		240.000				0.000												
Игл Бат, Eagle Butte	Ю	Канада	49 42с	110 30з	< 65	10.000				0.650												
Итуральде, Ituralde	Ю	Бразилия	12 30с	67 30з	0.011-0.032	8.000				0.000		ОС									кольца	очень плохой
Иминский	Ю	СССР				350.000				0.000		С										
Каибско-Чуйский	Ю	СССР				350.000				0.000		С										
Кайков, Kaiikov	Ю	ЮАР	32 30с	24 35в						0.000												
Каролина, Carolina, неск. шт.	Ю	США, С и Ю Каролина	33 45с	78 45з						0.000		Д								кратер	кольца	
Клири, Cleary	Ю	Канада	54 54с	108 04з		13.000				0.000		Д								озеро	кольца	
Климакка, Klimacka	Ю	США, Миссисипи	33 30с	89 33з		13.000				0.000		ца	ка	ка						гео. воз.	кольца	
Конлиан Базин, Conolly Basin	Ю	Австралия	23 32с	124 45з	< 60	9.000				0.741												
Косцельский, Koscielny	Ю	Польша			Под. пластов	40.000				0.000												
Крестон, Crestone	Ю	США, Колорадо	38 52с	105 39з						0.000		Д								кратер	кольца	
Ла Малба, La Malbaie	Ю	Канада			365-460	35.000				0.298												
Лабаннар, Labanar	Ю	СССР, Якут. ССР	62 30с	143 00в	150-300	30.000				0.187		С										
Лак Айро, Lac Iro	Ю	Чад	10 06с	19 25в		12.000				0.000		ОС								озеро	кольца	хороший
Ла-Шевелье-Ван-Незель	Ю	Швейцария				0.400				0.000		П										
Ливийская пустыня, Libyan Desert, 1 шт.	Ю	Египет	29 18с	25 30с		0.800				0.000		Д								кратер		
Мэкини, Mackinac	Ю	Канада	48 52с	79 01з		1.500				0.000		Д	в							кратер	кольца	
Мэлья, Malba	Ю	Судан	15 06с	26 15в		0.000				0.000		Д								кратер		
Маунт Дорен, Mount Doreen, 9 шт.	Ю	Австралия, С. Террит.	23 ю	113 в						0.000		Д								кратер		
Меджуада, Mejaouda	Ю	Нидерланды	22 43с	7 18з						0.000		Д								кратер		
Мекатина, Meckatina	Ю	Канада, Квебек	50 50с	59 22з		3.000				0.000		П?	Д							кратер		
Мэвилли, Melville, 2 шт.	Ю	Канада, С-З Территория	76 40с	109 00з		0.000				0.000		ца	ка	ка						гео. воз.		
Менлибек, Menibek, 2 шт.	Ю	Канада, Альберта	58 с	67 з		5.000				0.000											кольца	
Мертвуха, Miertwuel	Ю	Канада, Квебек	58 с	65 з		0.000				0.000		Д								озеро		
Мичиган, Michikan	Ю	Канада, Альберта	54 34с	64 27з		5.500				0.000		Д								кратер	кольца	
Мичиганский бассейн, Michigan basin	Ю	СССР			2.4	100.000				0.000												
Мишлифен, Michlifen, 2 шт.	Ю	Норвегия	32 с	3 в		1.900				0.000		Д								кратер		
Мора Куэли, Mora County	Ю	США, Нью-Мексико	36 с	105 з		0.009		1		0.000		Д	в							кратер		
Настарока, Nastaroka	Ю	Канада, Гудзонов залив	57 54с	80 02з		440.000				0.000		Д								кольца	кольца	
Нобиевалле, Nobiewale	Ю	Гана	10 35с	1 40з						0.000		Д								кратер		
Обан Ринг	Ю	Оман				6.000				0.000												
Опанминт, Opaminint	Ю	США, Калифорния	38 06с	117 22з		0.070			12	0.000		Д								кратер		
Парри Саунд, Parry Sound	Ю	Канада	45 22с	79 53з		2.500				0.000												
Печенская	Ю	СССР, Кольский п-ов								0.000												
Пиканин, Piccinon	Ю	Австралия	17 32с	126 25в	< 360	1.000				ОС	7.341									плоский	кольца	плохой
Потонский	Ю	СССР, Иркутская обл.	55 00с	116 58в		0.085				0.000		Д	в							кратер		
Претория Солт-Пан, Pretoria Salt Pan	Ю	ЮАР	25 25с	28 08с	1	1.020			90	0.961		П										

Плотность распределения структур на логарифмической плоскости $\log(T) - \log(D)$ показана на рис. I.12. Как и в случае достоверных импактных структур кратеры попадают в полосу $0.1 < \sqrt{T} / D < 10$ и также наиболее населенная область этой полосы соответствует структурам с большим диаметром и возрастом. Структуры, расположенные вне полосы, требуют уточнения их параметров и принадлежности к космогенным образованиям.

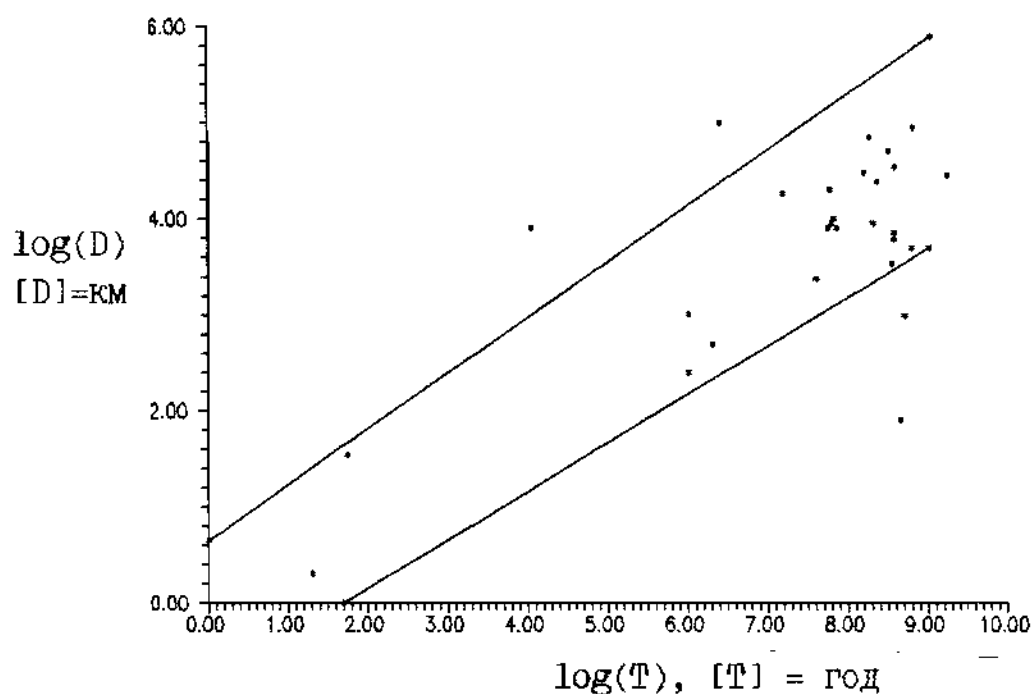


Рис. I.12. Распределение предполагаемых метеоритных кратеров по возрасту T и размерам D .

Заметим, что в отличие от каталога достоверных импактных структур рассматриваемый здесь каталог не содержит следующие поля: "характеристика пород мишени" и "рельеф истинного дна", данные для которых отсутствуют в литературе.

2. 0 ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ДЛЯ СЛОЖНЫХ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ

Описанный выше каталог импактных кратеров не содержит подробных числовых данных о геометрических размерах сложных структур. Хотя эти данные и немногочисленны, однако они разбросаны по различным источникам и нередко противоречивы. Предстоит еще большая работа по сбору и анализу этих данных. В качестве первого шага в этом направлении здесь рассматривается вопрос о горизонтальных размерах элементов сложных импактных структур и некоторых наблюдаемых закономерностях между размерами центрального и внутренних кольцевых поднятий.

Наиболее полные данные для 33 сложных импактных структур (см. таб. 2.1) приведены в работе [29]. Там же рассмотрен вопрос о корреляции размеров центрального и внутренних кольцевых поднятий.

Таблица 2.1

Горизонтальные размеры 33 сложных импактных кратеров Земли

Кратер	Диаметры (км)		
	Гребня вала	Основания топогр. центр. поднятия	Кольцевых поднятий
Кратеры с топографическим центральным поднятием			
Штейнхейм	3.7 ± 0.3	0.74 ± 0.1	---
Флинн-Крик	3.8 ± 0.1	0.9 ± 0.1	---
Ильинецкий	4.5 ± 0.5	0.9 ± 0.3	---
Декейтервилл	по 6.0 ± 0.5	по 1.5 ± 0.5	---
Карлинский	10.0 ± 2	1.0 ± 0.5	---
Ред Уинг	11.5 ± 2	< 4.5 ± 0.5	---
Николсон	12 ± 0.5	2.5 ± 0.5	---
Сьерра Мадера	13 ± 1	< 4 ± 1	---
Кентленд	13 ± 0.5	3 ± 0.5	---
Оболонский	15 ± 1	3.5 ± 0.5	---
Серра-де-Кангала	15 ± 0.7	4.5 ± 0.4	---
Кутюр "	16 ± 2	по 3.5 ± 1	?
Сент-Мартин "	23 ± 1	4 ± 1	?
Стин Ривер	по 23 ± 3	по 7 ± 1	---
Болтышский	25 ± 2.5	6 ± 1	---
Карский #	60 ± 2.5	по 10 ± 1	?

Продолжение таблицы 2.1

Кратеры с топографическим центральным и кольцевыми поднятиями			
Дип Бэй !!	$>10 \pm 1$	по 2 ± 0.5	по 19 ± 1
Хафтон	21 ± 1	3.5 ± 1	9 ± 1 ; 14.5 ± 1
Клируотер Вост. !!	22 ± 1	$<4 \pm 1$	44 ± 2
Госес Блаф	22 ± 0.5	$>4.5 \pm 0.2$	по 11 ± 1
Мистанстин	23 ± 2	3.5 ± 1	12 ± 2
Клируотер Зап.	32 ± 1	5.5 ± 1	16 ± 0.5 ; 64 ± 2
Шарлевуа	55 ± 5	по 7 ± 2	по 28 ± 2
Пучеж-Катунский	80 ± 5	по 7 ± 1	по 42 ± 2
Маникуаган	100 ± 3	по 8 ± 3	55 ± 5 ; 75 ± 3 ; 140 ± 5
Кратеры без топографического центрального поднятия			
Жаманшин **	13 ± 1	--	6.5 ± 1
Унапитей \$	17 ± 2	--	8.5 ± 2 ; 12 ± 2 ; 24 ± 2
Стренгуэйс	22.5 ± 2.5	--	10 ± 2
Рис **	25 ± 1	--	12 ± 1 ; 34 ± 2 ; 45 ± 2
Карсвелл	37 ± 2	--	19 ± 2
Сильян	52 ± 3	--	22 ± 3
Попигай **	95 ± 5	--	45 ± 3 ; 72 ± 3 ; 140 ± 5
Вредефорт	150 ± 10	--	75 ± 10

Обозначения:

по-плохо определенные диаметры

\$ -кольцо определяется по концентрической дренажной картине на географической карте

" -могут иметь внутренние кольца

-могут иметь не изображенные на карте кольца

!!-нет внутренних колец

**-могут иметь топографически не выраженное центральное поднятие

33 сложных импактных кратера, представленные в таблице, разделены на три основные группы: 1) кратеры с топографически выраженным центральным поднятием ($n=16$), один из которых (Карский) имеет столь большие размеры (60 км), что возможно должно быть по крайней мере одно нераспознанное кольцевое поднятие; 2) кратеры с концентрическими кольцевыми поднятиями, но без топографического центрального поднятия ($n=8$); 3) кратеры с обоими типами (центральным и концентрическим) кольцевых поднятий ($n=9$).

17 сложных импактных структур с концентрическими кольцевыми поднятиями (таб. 2.1) подразделяются на следующие три группы: 1) структуры с тремя и более кольцевыми поднятиями ($n=6$); 2) структуры с одним внутренним кольцевым поднятием ($n=9$) и 3) структуры Дип Бэй и Клируотер Восточный, каждый из которых имеет внешнее, но не имеет внутреннего кольцевого поднятия.

Анализ геометрически сложных импактных структур показывает:

- Для 15 сложных бескольцевых кратеров малого диаметра ($3,7 \text{ км} < D < 25 \text{ км}$) отношение диаметра основания топографического центрального поднятия к диаметру вала составляет $D_p / D = 0,23 \pm 0,03$.

- Для 7 больших сложных кратеров ($21 \text{ км} < D < 100 \text{ км}$) отношение D_p / D уменьшается от $0,19 \pm 0,035$ до $0,08 \pm 0,025$ с возрастанием диаметра кратера.

- Диаметр внутреннего кольца для кратеров с двумя кольцами составляет половину диаметра внешнего кольца.

- Соседние кольца в многокольцевых кратерах с тремя и более кольцами удалены друг от друга на расстояния, приблизительно равные $\sqrt{2} D$ (таб. 2.2), где $D = D_{IV}$ является диаметром главного кольца, наиболее выраженного не только по высоте, но скорее по ширине, непрерывности и полноте морфологии.

Таблица 2.2

Диаметры колец для сложных импантных структур, имеющих ≥ 3 колец и для неимеющих внутренних колец

Кратер	Диаметры колец (км)				
	D_{II}	D_{III}	D_{IV}	D_V	D_{VI}
Дип Бэй	--	--	10	--	19
Уанапитей	8.5	12	17	24	--
Хафтон	9	14.5	21	--	--
Клируотер Вост.	--	--	22	--	44
Рис	12	--	25	34	45
Клируотер Зап.	16	--	32	--	64
Маникуаган	55	75	100	140	--
Попигай	45	72	95	140	--

Расстояние между соседними кольцами в отдельных кратерах нередко составляет не $\sqrt{2} D$, а $0,5 D$ или $2 D$ (т.е. коэффициент при D является степенью 2). Это объясняется отсутствием отдельных колец.

Например, обнаружены четыре кольца кратера Рис с диаметрами D_{II} , D_{IV} , D_V , D_{VI} , но нет кольца с диаметром D_{III} . Однако пространственное расположение колец этого кратера все же удовлетворяет закону $\sqrt{2} D$. Положение кольца D_{III} просто не занято и поэтому наблюдаемые соседние кольца D_{II} и D_{IV} удалены друг о друга на расстояние $(\sqrt{2})^2 D = 2 D$. Отсутствующее кольцо либо не было сформировано, либо не распознано.

3. ОЦЕНКИ ОБЪЕМОВ ПОРОД, ПОДВЕРГШИХСЯ ПЕРЕРАБОТКЕ ПРИ УДАРЕ МЕТЕОРИТА

Объемы горных пород, которые подвергаются преобразованию при ударе метеорита, определяются энергией соударения, свойствами ударившего тела, а также строением и свойствами пород в месте удара.

Морфология зон с различными типами преобразований в крупных импактных кратерах является достаточно сложной. На зональность преобразований влияет радиальное затухание ударной волны и волн напряжений, пластические течения материала под точкой удара, расширение газов, возникающих при испарении ударника и части пород мишени, а также возвратные движения дна транзитной впадины.

3.1. ПАРАМЕТРЫ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ МЕТЕОРИТНОМ УДАРЕ

Метеоритный удар можно характеризовать, например, величиной начальной кинетической энергии $M_1 V_1^2 / 2$, где M_1 — масса ударника, V_1 — его скорость в момент соударения. Однако существенную роль в процессе кратерообразования играет также импульс ударника $I = M_1 V_1$. Очевидно, что уменьшение скорости ударника, например, с 10 км/сек до 10 м/сек даже при сохранении его кинетической энергии за счет увеличения массы принципиально изменит характер ударного процесса. На практике, как правило, скорости кратерообразующих метеоритов не известны. Представление о средней скорости падения метеоритных тел на Землю дает измерение современных метеоритных потоков.

Если удар метеорита характеризовать его начальной кинетической энергией KE , тогда в первом приближении на основании гипотезы энергетического подобия в областях мишени, удаленных от точки удара, на одинаковых приведенных расстояниях от точки удара $r/KE^{1/3}$ будут достигаться одинаковые давления в ударной волне p и одинаковые характерные времена спада давления в данной точке $t/KE^{1/3}$.

В диапазоне давлений от 100 кбар до 1 Мбар, где протекают основные процессы, приводящие к преобразованию вещества при метеоритных ударах - диаплектизации, фазовым переходам, плавлению и, наконец, частичному испарению, расчетное затухание давления на фронте ударной волны p под точкой удара можно представить в виде:

$$p \text{ (кбар)} \approx 0,2 (z/KE^{1/3})^{-2.7} \text{ (км/Мт}^{1/3}), \quad (3.1)$$

где z - глубина под точкой удара, которой достиг фронт ударной волны в рассматриваемый момент времени, KE - кинетическая энергия ударника, измеренная в миллионах тонн эквивалентного по энергии заряда тротила (1 Мт ТНТ = $4,2 \cdot 10^{22}$ эрг).

На расстояниях порядка размеров ударника ударная волна в мишени затухает слабо, давление ее на фронте почти постоянно и примерно равно начальному давлению в момент соударения p_0 . Давление p_0 можно рассчитать в приближении плоско - параллельного соударения пластин. Переработке давлением p_0 подвергается почти весь ударник и масса вещества мишени, примерно равная массе ударника.

Зависимость начального давления p_0 от скорости соударения V_{\perp} для случаев удара $ГА \rightarrow ГА$ ($ГА$ - габбро-анортозит), $Fe \rightarrow ГА$ и $лед \rightarrow ГА$ показаны на рис 3.1.

Эти зависимости были получены в результате численного решения одномерной задачи о соударении пластин в предположении, что поведение материала описывается уравнением состояния Тиллотсона:

$$p = \left[a + \frac{b}{e / (e_0 \eta^2) + 1} \right] e \rho + A \mu + B \mu^2,$$

где $\eta = \rho / \rho_0$, $\mu = \eta - 1$, p - давление, e - удельная внутренняя энергия, ρ - плотность, ρ_0 - начальная плотность. a , b , A , B , e_0 - константы, значения которых даны в таблице 3.1.

Расчеты соударения $лед \rightarrow ГА$ были проведены для трех значений плотности льда $\rho_0 = 1,293$; $0,97$ и $0,1$ г/см³, оставляя неизменными другие параметры уравнения состояния, указанные в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Значения параметров уравнения состояния Тиллотсона

Материал	ρ г/см ³	a	b	A мбар	B мбар	e_0 мбар см ³ /г
габбро- анортозит	2,936	0,5	1,145	0,705	0,751	4,89
лед	1,293	0,3	0,1	0,107	0,65	0,1
железо	7,8	0,5	1,5	1,28	1,05	0,095

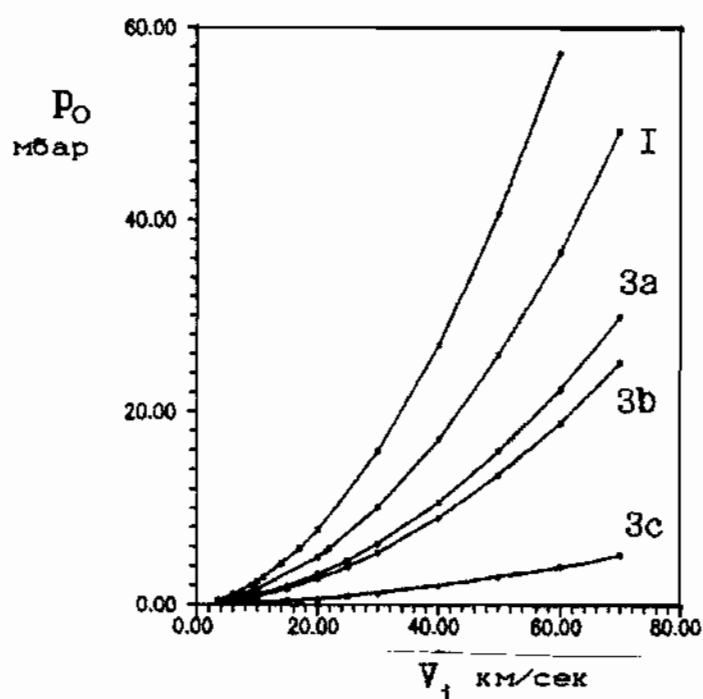


Рис. 3.1. Зависимость начального давления P_0 от скорости соударения V_1 для случаев удара
 1) ГА \rightarrow ГА (ГА - габбро-анортозит), 2) Fe \rightarrow ГА
 3a) лед \rightarrow ГА, $\rho_0 = 1,293$ г/см³
 3b) лед \rightarrow ГА, $\rho_0 = 0,97$ г/см³
 3c) лед \rightarrow ГА, $\rho_0 = 0,1$ г/см³

По мере распространения ударной волны давление на ее фронте начинает уменьшаться. Время поддержания начального давления p_0 в веществе определяется размером метеорита L и по порядку величины составляет L/c_0 , где c_0 - скорость звука в веществе мишени.

3.2. СВЯЗЬ ЭНЕРГИИ УДАРА И РАЗМЕРОВ КРАТЕРА

Данные наземных атомных взрывов в Неваде приводят к следующему соотношению между диаметром кратера D_a и энергией взрыва W :

$$D_a = cf \cdot K_n (W \rho_a / \rho_t)^{1/3.4} \quad (3.2)$$

где D_a в км, W - в килотоннах ТНТ эквивалента, $\rho_a \approx 1,8 \text{ г/см}^3$ - плотность алюминия в Неваде, ρ_t - средняя плотность пород в месте взрыва, cf - множитель, характеризующий коллапс кратера после его образования ($cf \approx 1,3$ для кратеров ≤ 3 км и $cf \leq 1,3$ для кратеров ≥ 4 км в диаметре), $K_n = 0,074 \text{ км(кТ} \cdot \text{ТНТ)}^{-1/3.4}$.

Если предположить, что при равенстве энергии взрыва W на определенной глубине и начальной кинетической энергии метеорита KE , образуются кратеры одних и тех же размеров, то тогда соотношение (3.2) можно использовать для оценок размеров ударных кратеров.

Чтобы оценить величину кинетической энергии метеорита, образующего кратер диаметром D_a , разрешим соотношение (3.2) относительно W и положим $KE = W$, в результате имеем:

$$KE(\text{Мт ТНТ}) = \frac{\rho_t}{\rho_a} \cdot \frac{10^3}{(cf \cdot K_n)^{3.4}} \cdot D_a^{3.4} \quad (\text{км}) \quad (3.3)$$

Отсюда для больших кратеров в кристаллических породах ($\rho_t = 2,4 \text{ г/см}^3$) получаем

$$KE(\text{Мт}) = 3,82 D_a^{3.4} \quad (\text{км}) \quad (3.4)$$

Например, кинетическая энергия метеорита, образующего кратер диаметром $D_a = 10$ км, равна 10^4 Мт.

3.3. ОЦЕНКИ ОБЪЕМОВ ИСПАРЕННОГО И РАСПЛАВЛЕННОГО ВЕЩЕСТВА МИШЕНИ

Уровни давлений и плотности внутренней энергии, необходимые для того, чтобы после разгрузки вещество подверглось частичному или полному плавлению и испарению, приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

*Уровни давления и плотности внутренней энергии,
необходимые для плавления и испарения веществ после разгрузки*

Фазовый переход	Железо		ГА		Водяной лед	
	р Мбар	е Мбар см ² г ⁻¹	р Мбар	е Мбар см ² г ⁻¹	р Мбар	е Мбар см ² г ⁻¹
Н.П.	2,2	0,0105	0,43	0,026	0,078	0,016
П.П.	2,6	0,0132	0,52	0,0337	0,104	0,021
Н.И.	4,2	0,0395	1,02	0,075	0,133	0,03
П.И.	16,8	1,02	5,9	0,573	0,165	0,6

Обозначения: Н.П. - начало плавления, П.П. - полное плавление,
Н.И. - начало испарения, П.И. - полное испарение.

Возможные фазовые переходы в веществе метеорита и мишени после разгрузки при ударе с различными скоростями на примере ледяного, ГА и железного метеоритов и ГА мишени указаны в таблице 3.3. Пороговые значения скоростей соударения, при превышении которых происходят фазовые переходы, изменяются для каждой комбинации ударник-мишень и, как следует из таблицы 3.3, они уменьшаются при увеличении плотности ударника.

Таблица 3.3

Возможные фазовые переходы в веществе метеорита и мишени после разгрузки при ударе с различными скоростями

V_1 км/с	P_0 Мбар	Фазовые переходы	
		в веществе метеорита	в веществе мишени
		Удар ледяного метеорита	
2,5	0,121	начало плавления	разрушение
2,9	0,147	полное плавление	разрушение
3,5	0,19	начало испарения	разрушение
6,3	0,435	частичное испарение	начало плавления
8,3	0,52	частичное испарение	полное плавление
12,4	1,02	частичное испарение	начало испарения
16,3	1,9	полное испарение	частичное испарение
32,0	6,02	полное испарение	полное испарение
		Удар каменного метеорита	
4,6	0,515	начало плавления	начало плавления
5,2	0,61	полное плавление	полное плавление
7,8	1,092	начало испарения	начало испарения
21,4	5,561	полное испарение	полное испарение
		Удар железного метеорита	
3,5	0,525	разрушение	начало плавления
3,8	0,586	разрушение	полное плавление
5,9	1,091	разрушение	начало испарения
9,0	2,062	начало плавления	частичное испарение
11,0	2,848	полное плавление	частичное испарение
14,0	4,232	начало испарения	частичное испарение
17,0	5,873	частичное испарение	полное испарение
30,0	15,93	полное испарение	полное испарение

Если начальное давление соударения p_0 существенно превышает пороговые значения давлений для полного испарения вещества, то количества испаренной и расплавленной породы в основном определяются кинетической энергией метеорита. Результат работы [30] для скоростей удара более 15 км/сек можно представить в виде:

$$M_p \approx 0,4 \text{ KE}, \quad (3.5)$$

где M_p - масса расплава, млн.т, KE - кинетическая энергия метеорита, Мт TNT.

При скорости удара более 30 км/сек в аналогичном виде можно представить массу ударно-испаренной породы:

$$M_i \approx 0,05 \text{ KE} \quad (3.6)$$

Используя оценку энергии кратерообразования метеорита по диаметру кратера (3.3), зависимости массы расплава и испаренного вещества (3.5) и (3.6) можно записать в виде:

$$M_p \text{ (Мт)} \approx 1,52 \cdot D^{3,4} \text{ (км)} \quad (3.7)$$

$$M_i \text{ (Мт)} \approx 0,19 \cdot D^{3,4} \text{ (км)} \quad (3.8)$$

Объем расплава, оцениваемый по формуле (3.7) в предположении, что плотность расплава $\rho_p = 3 \text{ г/см}^3$, сопоставлен с наблюдаемым количеством расплавленных пород в земных метеоритных кратерах (таб. 3.4). Как видно из таблицы 3.4, оценка (3.7) неплохо соответствует геологическим результатам в широком диапазоне размеров кратера.

Попигайский кратер образован в слоистой мишени и имеет диаметр по скальному основанию 75 км, а по верхнему осадочному чехлу - около 100 км. Поэтому для Попигайского кратера в таблице 3.4 даны оценки для двух значений диаметра.

Таблица 3.4
Объемы расплавленных пород в некоторых кратерах
Земли

Кратер	D _a км	Объемы расплава км ³			Z' _p (2.14) км	Z _p (2.11) км	КЕ метеорита Оценка (2.4) Мт ТНТ
		Наблю- дения [311, [32]	Оценка (2.7) ρ _p = 3г/см ³	Оценка (2.13)			
Брент	3,8	0,05	0,05	0,1	0,29	0,37	357,5
Мистастин	20	>12	13,4	28,4	>1,8	2,4	1 · 10 ⁵
Болтышский	22	12-20	18,6	39,2	1,8-2,1	2,7	1,4 · 10 ⁵
Клируотер 3.	32	34-50	66,4	140,2	2,5-2,9	4,1	5 · 10 ⁵
Маникуаган	65	>600	738,9	1568,6	>6,6	9,0	5,6 · 10 ⁶
Поширай	75*		1202,9	2538,6		10,6	9,1 · 10 ⁶
		1750			9,4		
	100**		3196,4	6751,2		14,7	2,4 · 10 ⁷

Обозначения: * Диаметр кратера в скальном основании.

** Диаметр кратера в осадочном чехле.

Затухание ударной волны под центром удара можно оценить по формуле (3.1). Подставляя в нее (3.4), получим соотношение

$$p = \frac{0,67 D_a^{3,06}}{z^{2,7}}, \quad (3.9)$$

где p - в к бар, D_a - диаметр, z - глубина в км.

Разрешив уравнение (3.5) относительно z , имеем:

$$z = \frac{0,86 D_a^{1,13}}{p^{0,37}} \quad (3.10)$$

Если за характерный уровень давления, необходимый для плавления кристаллических горных пород при разгрузке за ударной волной, принять величину порядка 600 кбар и подставить это значение давления в (3.5), то для максимальной глубины залегания расплавленных при ударе пород имеем следующую оценку:

$$z_p = 0,08 D_a^{1,13}, \quad (3.11)$$

где z_p и D_a в км.

Предполагая для простоты, что форма зоны расплава соответствует полусфере радиуса z_p , можно выразить объем расплава в виде:

$$V_p = \frac{2}{3} \pi z_p^3 \quad (3.12)$$

или, используя (2.7), в виде:

$$V_p = 0,00107 D_a^{3,4} \quad (3.13)$$

Объемы расплавов, полученные с помощью оценки (3.13), приведены в таблице 3.4. Оценка (3.13) дает завышенные значения по сравнению с оценкой (3.7).

В таблице 3.4 приведены также значения глубин расплавленных пород: z_p , вычисленное по формуле (3.11), и z_p' , вычисленное по следующей формуле

$$z_p' = (3V_p'/2\pi)^{1/3}, \quad (3.14)$$

где V_p' - объем расплавленных пород по геологическим данным.

3.4. ОЦЕНКИ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ КРАТЕРООБРАЗОВАНИИ.

Изучение хорошо сохранившихся метеоритных кратеров на поверхности Земли (например, Каали – Эстония, Метеор – США) показало, что под кратером имеется примерно полусферическая зона разрушенных пород. Кроме этого, под валом кратеров находится уплотненная приповерхностная зона разрушения, глубина которой уменьшается с удалением от центра кратера и становится равной нулю на расстоянии примерно равном двум радиусам кратера. Резких границ между раздробленным, трещиноватым и неповрежденным материалом горных пород не наблюдается.

В ближней к точке удара зоне, в которой возникают значительные деформации горных пород, исходное вещество дробится на отдельные блоки, которые в процессе последующего движения могут дополнительно измельчаться. На больших расстояниях, где перемещения материала малы, ударные волны и последующие течения приводят к возникновению в горных породах густой сетки трещин. С увеличением расстояний сетка трещин становится менее густой.

Для кратеров диаметров >10 км относительная глубина зоны разрушения уменьшается по сравнению с кратерами диаметром < 4 км.

При анализе структуры импактных кратеров нередко пренебрегают объемами пород, подвергшихся слабому трещинообразованию, что не всегда оправдано, в частности, с позиций распределения энергии удара, затраченной на различные виды преобразований.

Латеральная протяженность зоны трещиноватости R_T может быть удовлетворительно реконструирована путем непосредственных наблюдений. Глубина этой зоны h_T может быть определена из модели затухания ударной волны и волн напряжений на глубину с учетом изменения по разрезу прочностных свойств под влиянием литостатического давления и температуры.

Соотношения радиусов внешней границы зоны слабой трещи-

новатости R_T и видимого кратера R_a хорошо установлено при изучении кратеров ядерных взрывов и ряда импактных кратеров в осадочных и кристаллических породах [33], [6].

Согласно оценкам [6] $R_a/R_T = 0,528$ ($\sigma = 0,113$, $n = 18$) для диаметров кратеров от первых десятков метров до 100 км. Глубина нижней границы зоны слабой трещиноватости h_T , измеряемая по вертикали от точки удара, определена лишь для отдельных структур небольшого диаметра, для более крупных структур она может быть оценена по данным бурения и с использованием сейсмических и гравиметрических данных [6].

Анализ имеющихся данных указывает на уменьшение относительной глубины зоны трещиноватых пород h_T с увеличением радиуса R_T , причем резкое изменение зависимости между ними происходит при $R_T = 3 \div 8$ км или $D_a = (4-5) \div (9-10)$ км. При $D_a < 4-5$ км $h_T \approx 0,5 R_T^{1,3}$, при $D_a > 9-10$ км $h_T \approx 0,8 R_T^{0,8}$. Это в целом согласуется и с данными об изменении истинной глубины кратера с ростом его диаметра [34]. Изменение зависимости h_T от R_T близко к характеру зависимости $-\Delta g$ от D_a для кратеров с видимым диаметром до 4-5 км, но имеет иной характер для кратеров диаметром более 9-10 км (см. п.3.5).

Если внешнюю границу слабо трещиноватых пород грубо аппроксимировать поверхностью опрокинутого конуса с радиусом R_T и высотой h_T , то можно получить приближенную оценку общего объема преобразованных пород, включая и объем слабо разрушенных пород:

$$V_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \pi h_T R_T^2 \quad (3.15)$$

или, учитывая соотношение $R_T \approx R_a/0,528$,

$$V_{\text{пр}} = 3,76 h_T R_a^2$$

Этот объем в каждом конкретном случае значительно превышает объем испаренных, расплавленных, раздробленных и перемещенных пород - импактитов и аллогенных брекчий, причем с увеличением диаметра кратера доля слабо преобразованных пород

увеличивается.

Радиус внешней границы зоны слабой трещиноватости R_T можно выразить через кинетическую энергию метеорита. Для этого в соотношение $R_T = R_a / 0,528$ подставим выражение для радиуса видимого кратера, найденное из (3.4), и в результате получим:

$$R_T \text{ (км)} = 0,638 KE^{1/3,4} \text{ (Мт)} \quad (3.17)$$

Для сравнения приведем оценки размеров зоны разрушения при взрывах.

Эффективный размер зоны разрушения при ядерных и химических взрывах на большой глубине составляет

$$R_{ТВ} \approx 100 W^{1/3}, \quad (3.18)$$

где $R_{ТВ}$ - в метрах, W - полная энергия взрыва в кт ТНТ. При ядерном взрыве вблизи поверхности в грунт передается примерно 10 % энергии взрыва. Если предположить идентичность механизмов разрушения при контактных и подземных взрывах, тогда эффективный размер зоны разрушения можно оценить по формуле (3.18), подставив в нее вместо мощности взрыва W эффективную мощность $0,1 \cdot W$, т.е.

$$R_{ТВ} \text{ (м)} \approx 100 \sqrt[3]{0,1} W^{1/3} \approx 50 W^{1/3} \text{ (кт)} \quad (3.19)$$

или

$$R_{ТВ} \text{ (км)} \approx 0,5 W^{1/3} \text{ (Мт)} \quad (3.20)$$

3.5. РАЗУПЛОТНЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД.

Горные породы при разрушении разуплотняются вследствие нарушения исходной упаковки и возникновения пустот, а также за счет раскрытия микротрещин в результате действия ударных волн при кратерообразовании.

Разуплотнение пород в зоне разрушения приводит к заметному изменению ускорения силы тяжести под кратером. Картина гравитационных аномалий усложняется с ростом размера кратера [24], а также возрастает амплитуда отрицательной гравитационной аномалии. Если сделать следующие предположения:

1) размеры зоны разрушения подобны размерам кратера;
 2) зона разрушения имеет форму полусферы с радиусом кратера;
 3) величина разуплотнения в зоне разрушения постоянна и, следовательно, постоянен дефицит плотности $\Delta\rho$ и кроме того не учитывать влияние зоны разрушения под валом кратера, то амплитуда гравитационной аномалии в центре кратера будет выражаться формулой

$$\Delta g = \pi G \Delta \rho R, \quad (3.21)$$

где $G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ г}^{-1} \text{ см}^3 \text{ с}^{-2}$ - гравитационная постоянная, $\Delta\rho$ - дефицит плотности.

Если выразить величину аномалии силы тяжести в миллигаллах ($1 \text{ мГал} = 10^{-3} \text{ см с}^{-2}$), а диаметр кратера в км, и принять $\Delta\rho = -0,1 \text{ г/см}^3$, то

$$-\Delta g (\text{мГал}) \approx D (\text{км}), \quad (3.22)$$

где D - диаметр кратера.

Эта зависимость, как следует из рис. 3.2, дает неплохое представление о величине Δg для земных кратеров размером до 10-20 км в диаметре.

Для кратеров диаметром более 10-20 км рост амплитуды гравитационной аномалии с увеличением размеров кратера резко замедляется. Это можно объяснить подавлением разуплотнения на больших глубинах. Действительно, при диаметре кратера $D \approx 10-20$ км глубина зоны разрушения достигает 5-10 км., и литостатическое давление на таких глубинах составляет 1-3 кбар при плотности пород 2,5-3 г/см³. При таких давлениях возрастает прочность пород и затрудняется разуплотнение разрушенных горных пород.

Принято считать, что зона разуплотнения достаточно больших метеоритных кратеров увеличивается с ростом диаметра структуры только в боковом направлении, оставаясь приблизительно постоянной по глубине. В этом случае амплитуда аномалии над разуплотненным слоем постоянной глубины z_p оценивается как

$$\Delta g (\text{мГал}) = 42 \cdot \Delta \rho \cdot z_p (\text{км}) \quad (3.23)$$

Отсюда, например, для $\Delta\rho = -0,05 \text{ г/см}^3$ и глубин зоны разуплотнения, равных 5 и 10 км, $-\Delta g$ принимает соответственно значения 10,5 и 21 мГал. На самом деле, значения $\Delta\rho$ могут быть оценены только очень грубо. Заметим, что амплитуда гравитационной аномалии для земных кратеров, как следует из рис. 3.2, не превосходит величины, примерно равной 30 мГал. Это обстоятельство можно использовать для получения оценки $\Delta\rho$ сверху.

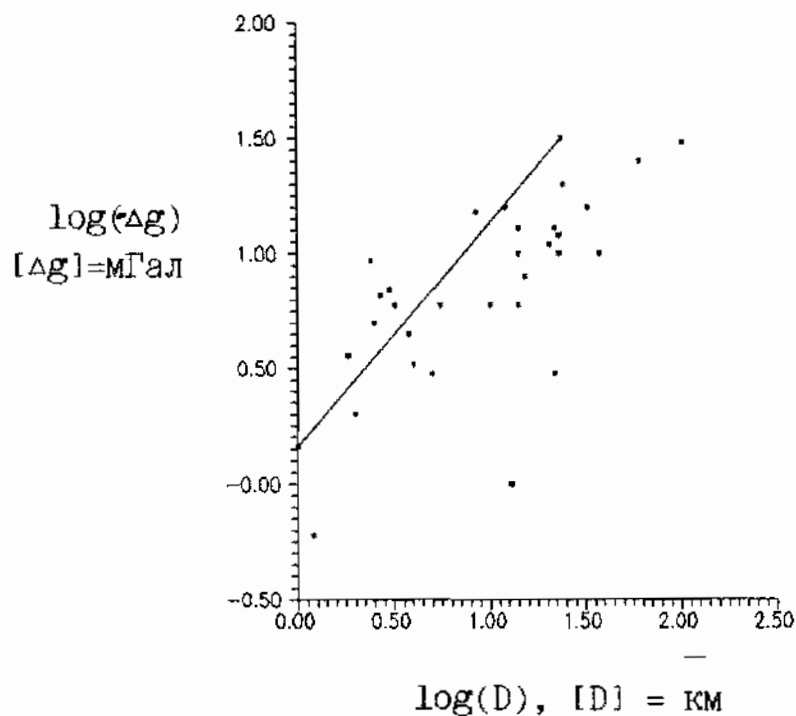


Рис 3.2. Зависимость амплитуды отрицательной аномалии $-\Delta g$ земных метеоритных кратеров от диаметра кратера D .

4. ПОДВОДНЫЕ КРАТЕРЫ

Принято считать, что 70 % всех метеоритов падает в океан. Однако пока обнаружен только один подводный кратер, расположенный на мелководье у берегов Новой Шотландии, который известен как структура Монтангнайс [35]. Это сложная ударная структура с координатами центра $42^{\circ} 53' \text{С}$, $64^{\circ} 13' \text{В}$ и размерами 28×32 км, удлинённая в направлении с севера-запада на юго-восток и имеющая центральное структурное поднятие, которое было обнаружено сейсмическими методами. Центральное поднятие перекрыто слоем смешанных брекчий толщиной около 500 м. В брекчиях наблюдается обилие признаков ударного метаморфизма, включая планарные деформации в кварце и плагиоклазе, ударные минералы и микрокристаллический ударный расплав. Отмечается наличие редкоземельных элементов и увеличение содержания иридия в кратерной зоне по сравнению с осадочными породами.

Оценки возраста структуры, полученные радиологическим методом (K - Ar) двумя группами исследователей и составляющие $49,9 \pm 2,1$ и $55,8 \pm 0,9$ млн. лет, согласуются с биостратиграфическим возрастом между ранним и средним Эоценом. Удар, вероятно, имел место на среднем шельфе с глубиной слоя воды 100-200 м.

Расположенный в восточной части моря Росса у континентальной окраины Антарктиды бассейн Челленджер, по мнению Хряниной [10], имеет ударное происхождение. Он представляет собой впадину диаметром 500 км и глубиной более 4 км. Она как бы вскрыта в кристаллическом фундаменте Антарктической плиты. Мощность земной коры под ней уменьшается и составляет менее 20 км. Бурение показало двадцатиметровую толщу брекчий у дна этого бассейна. Дно бассейна Челленджер подстилается породами, имеющими пониженные сейсмические скорости по сравнению с характерными сейсмическими скоростями для кристаллического цоколя Антарктиды.

Горизонт с пониженными сейсмическими скоростями (4,2 км/сек) в скважине 270 (см. рис.4.1) представляет собой трещиноватые породы кристаллического фундамента.

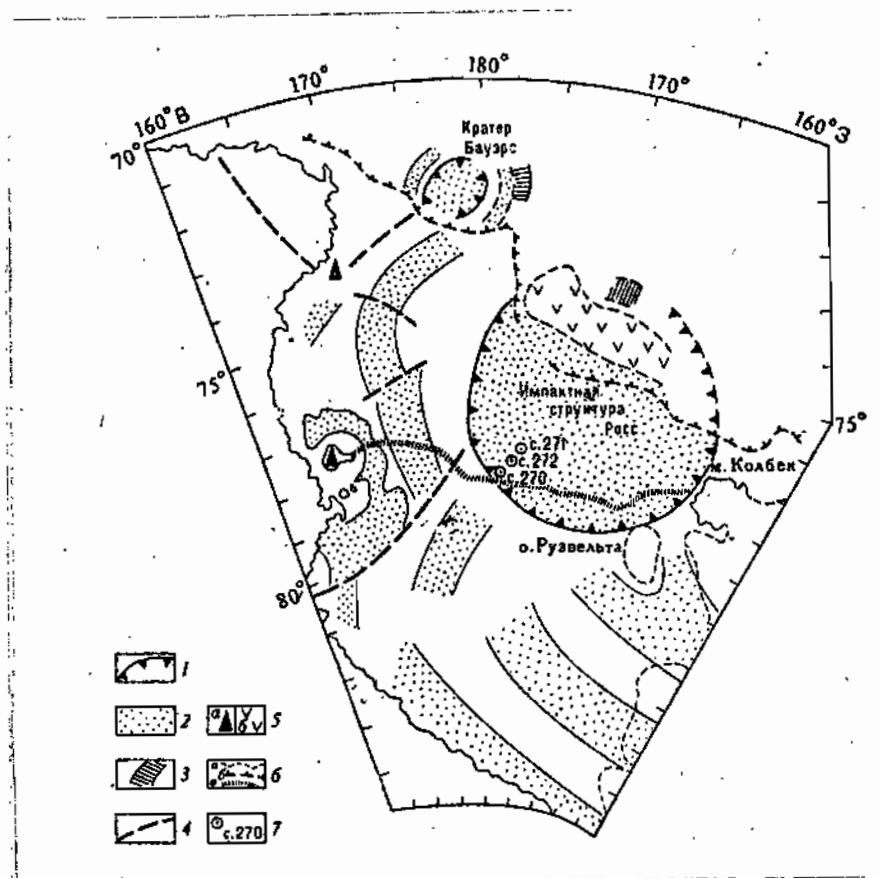


Рис.4.1. Тектонические структуры моря Росса (план).

1 - границы предполагаемых метеоритных кратеров; 2 - тектонические депрессии; 3 - горсты; 4 - разломы; 5 - вулканы (а) и вулканические поля (б); 6 - береговая линия (а), бровка шельфа (б) и граница ледового шельфа (в); 7 - скважины глубоководного бурения с судна "Гломар Челленджер"

С помощью сейсмических исследований под шельфом была обнаружена система дуговых горстов и грабенов, последний из которых тянется вдоль побережья моря Росса (см. рис.4.1). В целом эта система напоминает горсты и грабены многокольцевых метеоритных структур.

Ударное образование бассейна Челленджер, названного кратером Росса, относится к промежутку времени около 27 - 30 млн. лет, т.е. к границе олигоцен - миоцен.

В море Росса также расположен молодой, вероятно, плиоценовый метеоритный кратер диаметром 100 км - кратер Бауэрс.

Море Росса является одной из энергоактивных областей Мирового океана [10]. Так названы области, где энергообмен между океаном и атмосферой в 3-5 раз превышает фоновые значения для других областей. Другие энергоактивные области указаны в ряде окраинных морей - Баренцовом, Охотском, Японском, Мексиканском заливе и др. По мнению некоторых исследователей все эти области являются предполагаемыми метеоритными структурами. Метеоритное происхождение их пока не доказано.

В работах [36] - [38] сообщается об изучении осадков морского дна, в которых найдены микротектиты и сферулы, образовавшиеся при падении в южной части Тихого океана около 2,3 млн. лет тому назад астероида диаметром порядка 0,5 км.

5. О МЕТОДОЛОГИИ ПОИСКА И О ДИАГНОСТИКЕ КОСМОГЕННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР ЗЕМЛИ

5.1. ПОИСК И ДИАГНОСТИКА ИМПАКТНЫХ КРАТЕРОВ НА СУШЕ.

На начальном этапе исследования метеоритных кратеров считалось, что единственным критерием их идентификации являются находки железо-никелевых фрагментов в самом кратере или непосредственно вблизи него. Однако тот факт, что среди недавно упавших метеоритов каменных гораздо больше, чем железных, и многие каменные метеориты содержат относительно мало никеля, уже свидетельствует о недостаточности этого критерия.

В дальнейшем, изучение процессов кратерообразования и наблюдения самих кратеров показало, что на метеоритное происхождение кратеров указывает его глубинная структура и наличие связанных с кратером раздробленных пород и разломов.

В настоящее время разработано несколько групп признаков идентификации импактных структур, которые включают морфологические, структурные, геолого-тектонические, геофизические, признаки ударного метаморфизма, петрографические, минералогические, геохимические, а также присутствие метеоритного вещества.

К достоверным критериям относят непосредственные находки метеоритного вещества в виде рудных шариков и обломков, часто обогащенные никелем; специфические изменения минералов и горных пород — образование планарных элементов и диаплектовых стекол, импактитов, высокобарных модификаций кварца (коэсита и стишовита), конусов разрушения и остальные признаки ударного метаморфизма. Вопрос о конусах разрушения как критерии мощного взрыва был рассмотрен в работе [39]. В сочетании с особенностями морфоструктуры они однозначно характеризуют взрывные метеоритные кратеры.

Другие критерии: кольцевые формы рельефа с центральным поднятием, наличие концентрических и радиальных разломов, центробежных надвигов, специфические геофизические аномалии и т.д. используются в сочетании с достоверными критериями. По мнению некоторых исследователей космогенное происхождение

изучаемой структуры тем достовернее, чем больше критериев установлено для нее.

Рассмотрим некоторые методики отнесения структур к достоверным импактным образованиям. Отличия между ними, в основном, состоят в количестве и выборе критериев, используемых для идентификации.

Наиболее простая методика была применена для идентификации бассейна Штенхейм (ФРГ), депрессии Рис (ФРГ), бассейна Уэлс Крик (США), возмущения Кентленд (США) и структуры Серпент Маунд (США). Эти образования отнесены к космогенным структурам [40] на основе сходства их с теоретической моделью ударной структуры, представляющей центральное поднятие, окруженное кольцевой депрессией и возможно другими кольцевыми поднятиями и депрессиями, а также использования следующих дополнительных критериев: присутствие в кратере коэсита или стишовита, наличие конусов разрушения, наличие эродированных остатков кольцевой антиклинали и синклинали, окружающих приподнятый центральный купол.

Более сложные комплексные исследования были выполнены для канадских кратеров [41]. В качестве рабочей гипотезы принималась определенная модель кратера. Например, в случае простого кратера - это округлая в плане форма, наличие вала и центральной депрессии, наличие под дном кратера линзы брекчий, простирающейся до глубины около $1/3$ диаметра кратера, понижение плотности брекчий по сравнению с окружающими породами, следы в ней ударной деформации и ударного метаморфизма, присутствие импактитов, высокobarических модификаций и конусов разрушения.

Для подтверждения этих предположений проводились геологическое и геоморфологическое обследование кратеров, а также гравиметрическая, магнитная и сейсмическая съемки и разведочное бурение. Полученный при бурении материал подвергался петрографическому и минералогическому исследованию. В процессе изучения кратера в исходные предположения вносились корректировки.

По мере увеличения размеров кратера, многие из наблюдаемых для меньших кратеров закономерностей видоизменяются. Наибольшие изменения происходят в структуре кратера, и возникает необходимость в построении новой модели кратера, которая включала бы в себя центральное поднятие и/или кольцевое поднятие и кольцевую депрессию.

Отнесение кратеров к *достоверным импактным структурам* в работе [1] производилась на основе следующих критериев:

- Морфологический: кругообразные очертания, форма кратера удовлетворяет с учетом эрозии теоретическим морфометрическим соотношениям; усложнение формы с ростом размеров - центральное поднятие у кратеров диаметром 5-30 км, кольцевые поднятия и депрессии у кратеров диаметром более 30 км. Учитывалась возможность модификации формы кратера под действием последующих тектонических движений (Садбери) или в результате неравномерности эрозии (Ильинецкая астроблема).
- Метеоритное вещество: находки метеоритных обломков, метеоритной пыли и металлических сферул; учитывалось повышенное содержания никеля в 3-5 раз по сравнению с породами мишени.
- Конусы разрушения, как макроскопический признак мощного взрыва.
- Ударный метаморфизм.
- Ударное плавление: импактные стекла отличаются от стекол другого генезиса признаками перегрева расплава и наличием обломков ударно-метаморфизированных пород.
- Наличие высокobarических модификаций: коэсита, стишовита и др.
- Геофизические признаки: локальная отрицательная аномалия силы тяжести, особенности проявления кратеров в магнитных и электрических полях.

Диагностика некоторых астроблем СССР [8] была проведена на основе анализа комплекса признаков, важнейшим из которых является ударный метаморфизм. Принималось во внимание также наличие сохранившихся частей морфоструктуры, результаты геологических и геофизических исследований и разведочного бу-

рения. Особое внимание было уделено строению астроблем и составу образующихся при взрыве брекчий и импактитов в зависимости от строения и состава пород цоколя.

Некоторые примеры наборов диагностических признаков для импактных структур Земли были рассмотрены также в разделе 1.2. Подчеркнем, что одним из важных диагностических признаков, отличающих импактные структуры от эндогенных, является их бескорневой, наложенный характер. Он определен затуханием зоны дробления с глубиной (глубина дробления меньше диаметра), малыми отношениями глубин центра тяжести гравианомалий к диаметру – порядка 0,1–0,25 (для эндогенных – 0,5–1,0), отсутствием подводящего канала с магматическим включением, ксенолитами пород, вскрытых полостью кратера (включая зону дробления). В противоположность этому эндогенные структуры содержат ксенолиты глубинных пород вплоть до мантийных. В импактных структурах в базальтах наблюдается площадное распространение брекчий, а в эндогенных брекчии встречаются лишь локально.

Для уточнения оценок частоты импактных событий требуется проведение идентификации космогенных кольцевых структур (ККС) среди множества кольцевых структур (КС) Земли. Дадим краткий перечень некоторых этапов работ по идентификации ККС.

- 1) Выбор региона для проведения исследований.
- 2) Выбор наиболее перспективного района в пределах выбранного региона.
- 3) Сбор необходимых материалов (аэрокосмических снимков, различных карт : космогеологических, магнитных и гравитационных аномалий и др.).
- 4) Выбор методов выделения КС.
- 5) Выделение возможных КС для выбранного района.
- 6) Подтверждение гипотезы о том, что выделенная структура является кольцевой структурой.
- 7) Предварительное изучение геологического строения района.
- 8) Выбор типовых морфоструктурных моделей для возможных ККС района.

- 9) Выбор критериев для выделения ККС.
- 10) Выделение возможных ККС среди выделенных КС района.
- 11) Планирование геолого-геофизических исследований для выделенных возможных ККС района.
- 12) Выбор критериев идентификации для подтверждения гипотезы о космогенности КС.
- 13) Проведение наземных полевых работ с целью уточнения геологического строения структуры, обнаружения в ней следов ударного воздействия и сбора образцов брекчий и импактитов.
- 14) Обработка полученного материала.
- 15) Сравнение исследуемой КС с достоверными космогенными структурами с целью подтверждения гипотезы о ее космогенном происхождении.

Заметим, что в процессе выполнения работы по идентификации ККС отдельные ее этапы могут повторяться.

Кратко охарактеризуем некоторые этапы работ по идентификации ККС.

Принято считать, что образование космогенных структур происходило равномерно по всей поверхности Земли. Однако при выборе региона и района исследований (этапы 1 и 2) следует принимать во внимание факторы, способствующие успешному выявлению ККС:

- повышенную сохранность ККС, которая характерна для устойчивых в геологическом отношении регионов - древних щитов и платформ;
- минимальное проявление эндогенных процессов, например, отсутствие вулканических пород;
- отсутствие мощного покрова рыхлых отложений.

При выполнении этапа 3 желательно отобрать аэрокосмические снимки разного разрешения и времени съемки, а также карты разных масштабов.

Выбор критериев на этапах 9 и 12 и последовательность их проверки могут быть разнообразны. Приведем один из примеров.

Критерии выделения возможных ККС на этапе 9 могут вклю-

чать, например:

Морфологические признаки:

- круговая форма в плане;
- отрицательная форма рельефа;
- отношение глубины впадины к диаметру КС, равное 0,1-0,25;
- наличие центрального поднятия или центральной горки (и/или одного или нескольких поднятий) у сложных кратеров.

Структурные признаки:

- наличие разломов (кольцевых, радиальных, центральных подвигов, взбросов, сбросов);

а для хорошо сохранившихся структур:

- контрастный характер с окружающим геологическим фоном и ландшафтом;
- наличие вала;
- присутствие крупных глыб в выбросах (размером до нескольких сотен метров);
- наличие периферических выбросов за пределами морфологически выраженной круговой впадины (на расстояниях нескольких радиусов кратера);
- струйчатый радиально-лучевой характер выбросов;
- радиальные желоба.

Геофизические признаки, например,

- интенсивные магнитные аномалии.

Критерии идентификации ККС на этапе I2 могут включать, например:

Структурные признаки:

- отсутствие в выбросах пород глубинных горизонтов;
- обратная стратиграфия выбросов в геологическом разрезе;
- наличие зоны брекчий, периферических выбросов;
- отсутствие подводного канала с магматическим наполнением.

Геофизические признаки, например,

- гравитационные аномалии.

Признаки взрыва:

- затухание зоны дробления с глубиной;
- наличие конусов разрушения;

- следы ударного плавления: импактные стекла с признаками перегрева расплава и наличие обломков ударно-метаморфизированных пород;
- наличие высокобарических модификаций: коэсита, стишовита и др;
- наличие признаков ударного метаморфизма.

Наличие метеоритного вещества.

Выбор критериев идентификации ККС является одним из важных решений, которые принимаются в процессе идентификации. Возможны различные варианты выбора этих критериев и желательно найти такие из них, которые позволили бы надежно и с наименьшими трудозатратами идентифицировать импактные структуры.

5.2. К ПОИСКУ ПОДВОДНЫХ ИМПАКТНЫХ КРАТЕРОВ.

Ударное кратерообразование - это уникальный геологический процесс, если учесть, какое огромное количество энергии выделяется на небольшом пространстве в короткие промежутки времени. Величина выделяемой энергии зависит главным образом от скорости и размеров выпадающего небесного тела. При значительной энергии соударения это воздействие не ограничивается локальными эффектами и может иметь региональный, а иногда и глобальный характер.

Мощный удар метеорита на акватории приведет к испарению значительного объема воды и возникновению гигантских волн типа цунами, которые могут распространяться на большие расстояния от места падения. На океанском дне в месте падения образуется подводный импактный кратер.

Подводные импактные кратеры скрыты под толщей воды и осадков, что создает дополнительные трудности при их поиске.

Крупные подводные импактные кратеры должны иметь отличительные особенности.

При ударе крупного метеорита образуется отверстие в толще воды, и в морском дне формируется экскавационный кратер, из которого выбрасывается большое количество испаренной,

расплавленной и раздробленной породы морского дна. Спустя некоторое время поток воды, распространяющийся от места удара, останавливается и затем развивается мощный возвратный поток, который закрывает отверстие в океане. Возвратный поток, содержащий большое количество отложений и выбросов из полости кратера, переносит их обратно к центру транзитного кратера. В геологическом масштабе времени астеносфера течет в направлении к транзитной полости, выдавливает дно полости и в результате сильно уплотняет начальный кратер. Когда дно кратера поднимается, вал оседает и формирует скалы, окружающие импактный кратер на морском дне.

Испаренные породы морского дна, выброшенные с высокими скоростями на большие высоты, конденсируются и по баллистическим траекториям выпадают на поверхность Земли, оставляя следы ударных событий. Они могут быть зафиксированы в океанических осадках горизонтами микротектитов и сходных с ними стеклянных сферул, сопровождаемых местами признаками ударного метаморфизма.

С другой стороны, выпадение космического тела может сопровождаться шлейфом рассеяния космического вещества, который указывает траекторию полета космического тела. Например, Австрало-Азиатский пояс тектитов.

Океаническая кора имеет сравнительно малую мощность по сравнению с континентальной (4 - 25 км вместо 50 км). Поэтому при образовании крупных импактных кратеров в местах маломощной коры трещины могут проникать в верхнюю мантию. Это приводит к падению давления, и в результате сжатое вещество мантии с температурой более 1000°C мгновенно расплавится, и произойдут массовые площадные излияния базальтовых магм. Базальты, застывая, образуют океаническую кору, которая покрывает центральное поднятие кратера, представляющее собой мелководное океаническое плато. На мелководье вдали от суши могут отлагаться карбонатные осадки. С течением времени центральное поднятие начнет оседать и продолжающиеся накапливаться мелководные карбонатные осадки будут иметь большие мощности. Эта

гипотеза была высказана К.Роджерс. Действительно, плато Шатского, Манихики, Онтонг на Западе Тихого океана покрыты мощными толщами мелководных карбонатных осадков, а под ними залегают базальтовые толщи, где обнаруживаются пузырьки газов, свидетельствующие о застывании этих базальтов на мелководье [10].

Кора на шельфе толще, чем в глубоководной части океана. Процессы формирования и релаксации импактных кратеров на мелководном шельфе в большей степени приближаются к случаю кратерообразования на суше, чем в глубоководной части океана, где океаническая кора наиболее тонка. Поэтому для поиска ударных кратеров на шельфе можно использовать некоторые группы признаков из тех, которые привлекаются для идентификации импактных кольцевых структур на суше.

Единственный обнаруженный подводный импактный кратер Монтангнайс расположен на мелководье у берегов Новой Шотландии.

По мнению некоторых исследователей энергоактивные области Мирового океана расположены в местах подводных кратеров. Такие области наблюдаются, например, в море Росса у берегов Антарктиды, в ряде окраинных морей - Беринговом, Охотском, Японском, Мексиканском заливе (см. раздел 4).

Выше отмечено, что подводные кратеры могут быть покрыты базальтовой корой. Другие могут быть погребены под толстым слоем осадков, а наиболее древние из них могли быть разрушены либо вообще исчезли в результате тектонических движений океанической коры.

Сказанное выше не только подчеркивает трудности поиска подводных кратеров, но в тоже время указывает и на некоторые возможности поиска и позволяет сделать следующие выводы:

- 1) Сохранившиеся подводные импактные кратеры могут иметь уплощенную форму.
- 2) Вероятность сохранности крупных подводных импактных кратеров в районах мощной коры выше, чем в местах маломощной коры.
- 3) Морфометрические соотношения для импактных кратеров на

шельфе могут быть аналогичны соотношениям для импактных кратеров на суше.

4) Для прогноза возможных мест нахождения подводных импактных кратеров могут быть использованы следующие данные: а) кольцевое расположение островов, кольцевые контуры островов или подводных впадин, кольцевое расположение облаков, теплового потока в области шельфа; б) палеогеографические данные о воздействиях волн цунами, которые в слое осадков в плоскодонном бассейне сравнительно небольшой глубины могут быть прослежены на очень большие расстояния по разным направлениям от места удара; в) наличие мелководий вдали от суши с мощным слоем карбонатных осадков; г) энергоактивные области Мирового океана; д) следы космических катастроф; е) шлейфы рассеяния космического вещества.

Характерные признаки импактных кратеров на суше могут быть условно разделены на три группы: 1) морфоструктурные, 2) минерало-петрографические и 3) геофизические. При установлении космогенного происхождения кратера на суше выявлению первых двух групп признаков придается большее значение, чем геофизическим. Визуальные наблюдения подводных кратеров затруднены и поэтому сложнее провести анализ первых двух групп признаков, чем анализ третьей группы.

Геофизическими признаками импактных структур являются аномалии физических полей. Они возникают в зоне воздействия космического тела и исследуются геофизическими методами - гравиметрическими, сейсмическими, электро- и магнитометрическими, а также фиксируются инфракрасной, или тепловой съемкой.

Центральным зонам импактных кратеров соответствуют отрицательные гравитационные минимумы, иногда осложненные локальными максимумами. В магнитном поле импактные кратеры проявляются благодаря концентрическому расположению аномалий. В центрах структур отмечаются отрицательное и пониженное магнитное поле. У хорошо сохранившихся кратеров магнитные и гравитационные аномалии повторяют округлые очертания кратера. При погоризонтальной съемке и магнитные, и гравитационные по-

ля под импактной структурой обнаруживают приповерхностный бескорневой характер, быстро затухая по высоте. Сказанное о магнитных и гравитационных аномалиях относится к импактным кратерам на суше. Предположим, что это в некоторой степени распространяется и на подводные импактные кратеры, расположенные на шельфе.

Геофизические методы могут быть одним из методов поиска импактных подводных кратеров. Этот метод поиска основан на анализе геофизических материалов.

Сейсмические методы важны для диагностики импактных кратеров и расшифровки их глубинного строения.

Рассмотрим возможные подходы к поиску подводных импактных кратеров. Прежде всего необходимо дать прогноз возможных мест нахождения подводных импактных кратеров. Это достигается различными путями:

1. Анализ карт рельефа морского дна с целью выделения кольцевых расположений островов, кольцевых контуров островов или подводных впадин.

2. Анализ геологических карт морского дна с целью выделения расположенных вдали от суши мелководий с мощным слоем карбонатных осадков с учетом имеющихся данных о микротектиках и сходных с ними стеклянных сферулах в океанических осадках.

3. Выделение в Мировом океане мест, над которыми наблюдаются кольцевое расположение облаков и тепловых потоков.

4. Анализ палеогеографических воздействий волн цунами с целью определения мест зарождения цунами.

5. Проведение комплексного анализа, включая геологические карты морского дна, карты геофизических аномалий (гравитационные, магнитные, тепловые), имеющиеся данные по вертикальным сейсмическим разрезам океанической коры и геохимические данные.

Каждый из перечисленных подходов необходимо сочетать с анализом имеющихся данных о следах ударных событий для рассматриваемого района. С целью повышения надежности результатов о возможных местах нахождения подводных импактных крате-

ров желателен синтез указанных выше подходов. Следует уделить пристальное внимание энергоактивным областям Мирового океана.

Для установленного места возможного нахождения подводного импактного кратера особенно важно провести сейсмические исследования с целью расшифровки глубинного строения кратера. Желательно проложить два взаимно ортогональных вертикальных разреза сейсмических скоростей. Кроме того необходимо по возможности выполнить наиболее полный комплекс геолого-геофизических исследований аналогично тому, как это делается на суше. Этот вопрос был неоднократно освещен, и поэтому мы на нем не останавливаемся. И, наконец, для окончательного подтверждения импактного происхождения кратера необходимо установить наличие в его породах следов ударного воздействия, для чего требуется провести бурение скважины и забор пород в центральной части кратера и исследовать их на присутствие признаков ударного метаморфизма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последние три десятилетия в связи с развитием новых направлений в геологии интенсивно изучаются метеоритные кратеры на поверхности Земли. Эти исследования привели к открытию в различных районах земного шара новых импактных структур. Общее количество установленных к настоящему времени достоверных импактных структур достигло ≈ 125 . Ежегодно списки импактных структур пополняются двумя-четырьмя кратерами, растет список предполагаемых импактных структур. Продолжается всестороннее изучение закономерностей их внутреннего строения, процессов ударного кратерообразования и ударной переработки различных типов пород, исследуется состав кратерообразующих метеоритов.

Для решения задач, возникающих в этой области исследований, необходима информация об импактных структурах. С этой целью создаются каталоги импактных структур. Однако количество информации об импактных структурах неуклонно растет, и задача автоматического хранения и использования ее становится весьма актуальной. Решению этой задачи отвечает создание компьютерных банков данных.

В данном отчете представлен банк данных импактных структур Земли, разработанный на персональном компьютере IBM PC/AT. Он включает в себя базу данных для 125 достоверных и 110 предполагаемых импактных структур с 24 полями информации для каждой из них. Отличительной чертой базы данных является содержание в ней, по возможности, количественных данных об импактных структурах. К сожалению эти данные не полны и требуют дальнейшего уточнения.

Банк данных позволяет автоматизировать работу с данными: делать выборки по заданному критерию, получать статистические оценки некоторых параметров, строить графики, гистограммы, отражать распределение импактных структур на карте. В отчете приведены многочисленные примеры автоматизированной обработки данных об импактных структурах. В частности, представлены таблицы данных о простых кратерах, кратерах с цент-

ральным поднятием и многокольцевых структурах, о структурах с обнаруженным метеоритным веществом и их распределении по виду метеоритного вещества, о распределении импактных структур по степени эрозии; графики зависимости числа кратеров от диаметра и возраста, кумулятивного числа кратеров от приведенного возраста, амплитуды гравитационной аномалии, значений дефектной массы и глубины залегания ее центра тяжести от размеров структуры, распределения кратеров в зависимости от диаметра и возраста; гистограмма распределения структур по диаметру; карты географического распределения структур по континентам с учетом их размеров, географического распределения структур, в которых были найдены конусы разрушения.

Разработанный банк данных может широко использоваться в информационных и научно-исследовательских целях. В частности, для изучения распространения импактных структур на поверхности Земли и частоты их образования, условий сохранности структур в зависимости от возраста, размеров, и пород мишени, для изучения зависимостей грави-магнитных аномалий, состава брекчий и импактитов от размеров структуры, характера выраженности тех или иных диагностических признаков в зависимости от пород мишени. Некоторые импактные структуры, содержащиеся в базе данных и относящиеся к различным морфоструктурным классам, можно использовать в качестве эталонных при диагностике импактных структур.

По-прежнему остается актуальной проблема выбора таких диагностических признаков, которые позволяли бы надежно и с наименьшими трудозатратами идентифицировать импактные структуры Земли. Использование банка данных об импактных структурах может способствовать решению этой проблемы.

Разработанный банк данных в дальнейшем может стать составной частью мониторинга, предназначенного для диагностики импактных структур. Однако в этом случае может потребоваться расширение базы данных. В связи с этим укажем некоторые возможные направления работ:

- сбор данных о составе пород мишени и геолого-тектонической

обстановке в районе импактной структуры;

- выделение и описание характерных типов морфоструктурных моделей кратеров;
- сбор данных о составе брекчий и импактитов и закономерностях их распределения;
- сбор данных о закратерных выбросах;
- сбор данных о форме, размерах и расположении разломов в окрестности импактных структур.

Несмотря на значительные различия импактных структур по размерам, геологическому возрасту, особенностям внутреннего строения и составу залегающих в них пород, они обладают рядом общих особенностей, что позволяет охарактеризовать их в целом и установить некоторые общие закономерности. Эти вопросы были также рассмотрены в данном отчете.

Проблема обнаружения метеоритных кратеров в океане наименее разработана. Имеется лишь несколько сообщений об открытии океанических импактных структур. Однако они еще слабо изучены. Если учесть, что 70% земной поверхности покрыто океаном и принять гипотезу о случайном и равномерном распределении импактных событий на земном шаре, то становится очевидным насколько важно решить проблему обнаружения океанических импактных структур для уточнения оценок частоты импактных событий. Надежды на решение этой проблемы мы связываем с совершенствованием дистанционных методов исследования кольцевых структур, например, методов грави-магнитных и тепловых аномалий, а также с разработкой новых физических методов дистанционного обнаружения импактных структур.

Литература

1. Вальтер А.А., Гуров Е.П. Установленная и предполагаемая распространенность взрывных метеоритных кратеров на Земле и их сохранность на Украинском щите. // Метеоритные структуры на поверхности планет. М.: Наука, -1979, -с. 126-148
2. Взрывные кратеры на Земле и планетах. М.: Мир, -1968
3. Гуров Е.П., Гурова Е.П. Импактные структуры на поверхности Земли. // Геологический журнал, -1987, -т. 47, №1, -с. 117-123
4. Зоткин И.Т., Дабижа А.И. Эволюция метеоритного кратера как процесс случайных перемещений. // Метеоритика, -1982, -в. 40, -с. 82-90
5. Импактиты. Под редакцией А.А. Маракушева. М.: Изд-во МГУ, -1981
6. Масайтис В.Л. и др. Геология астроблем. Л.: Недра, -1980
7. Масайтис В.Л. и др. Метеоритные кратеры и астроблемы на территории СССР // ДАН СССР, -1978, -т. 240, №5, -с. 1191-1193
8. Масайтис В.Л. Основные черты геологии астроблем СССР // Метеоритные структуры на поверхности планет. М.: Наука, -1979, -с. 173-191
9. Фельдман В.И. Каталог астроблем и метеоритных кратеров Земли // Метеоритика, -1987, -в. 46, -с. 154-171
10. Хрянина Л.П. Метеоритные кратеры на Земле. Л.: Недра, -1987
11. Astronauts guide to terrestrial impact craters. -1988
12. Classen J. Catalogue of 230 certain, probable and doubtful impact structures. // Meteoritics, -1977, -vol. 12, -p. 61-78
13. Dence M.R. The nature and significance of terrestrial impact structures. 24th Internat. Geol. Congr. -1972, -Sect. 15, -p. 77-89
14. Grieve R.A.F. Terrestrial impact structures // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. -1987, -vol. 15, -p. 245-270
15. Grieve R.A.F., Robertson P.B. The terrestrial cratering record. // Icarus, -1979, -vol. 38, -p. 212-229
16. Mann C.J. Revised classification of meteoritic impact sites on Earth. // Meteoritics, -1985, -vol. 20, -№3, -p. 591-592

17. Фельдман В.И. Космогенные и эндогенные кольцевые структуры Земли (критерии разграничения). // 27-й Международный геологический конгресс. Сравнительная планетология. Секция С.19. - М.: Наука, -1984, -т.19, -с.104-110
18. Гринберг Ф., Гринберг Р. Самоучитель программирования на входном языке СУБД dBASEIII. М.: Мир, -1989
19. Алексеев А.С., Зейлик Б.С., Ляпидевская З.А., Петренко В.Е., Салов Г.И. Методики исследования кольцевых структур. Критерии идентификации космогенных кольцевых структур. НГО по теме "Патруль", книга 5, Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, -1990
20. Дабиха А.И., Зоткин И.Т., Федынский В.В. О распределении метеоритных кратеров на поверхности Земли. // Метеоритные структуры на поверхности планет. М.: Наука, -1979, -с.117-125
21. Дабиха А.И., Федынский В.В. Особенности гравитационного поля астроблем. // Метеоритика, -1977, -в.36, -с.113-119
22. Innes M.J.S. The use of gravity methods study the underground structure and impact energy of meteorite craters. // J.Geophys.Res., -1961, -vol.66
23. Kahle H.G. Abschätzung der Störungsmasse in Nordlinger Ries. // Z.Geophysik, -1967, -vol.33
24. Дабиха А.И., Федынский В.В. Геофизическая характеристика метеоритных кратеров. // Метеоритные структуры на поверхности планет. М.: Наука, -1979, -с.99-116
25. Stoffler D. Progressive metamorphism and classification of shocked and brecciated crystalline rocks of impact craters. // J.Geophys.Res., -1971, -vol.76, -№23, -p.5541-5551.
26. Масайтис В.Л., Райхлин А.И., Селивановская Т.В. Общие принципы классификации и номенклатуры взрывных брекчий и импактитов. // Литология и полезные ископаемые, -1978, -№1, -с.125-133.
27. Ortro S.J., Chandler J.F., Hine A.A., Rosema K.D., Shapiro J.J., Yeoman D.K. Radar Images of Asteroid 1989 PB. // Science, -1990, -vol.248, -№4962, -p.1523-1528.
28. Современные идеи теоретической геологии. Абрамович И.И., Груза В.В., Клущин И.Г., Масайтис В.Л., Романовский С.И. - Л.: Недра, -1984.

29. Pike R.J. Some morphologic systematics of complex impact structures // *Meteoritics*, -1985, -20, -p.49-68.
30. Ahrens T.J., O'Keef J.D. Equations of state and impact-induced shock-wave attenuation on the Moon. -In: *Impact and explosion cratering*. N.Y. Pergamon press, -1977, p.639-656.
31. Masaitis V.L., Mashchak M.S. Distribution of impactites in some large astroblems of the USSR territory. -In: *Lunar and Planet.Sci.XI.Houston: Lunar Planet. Inst.* -1980, -p.674-676.
32. Orphal D.L. Calculation of explosion cratering. -I: The shallow - buried nuclear detonation Iohnio-Boy. -In: *Impact and explosion cratering*. N.Y. Pergamon press, -1977, -p.897-906.
33. *Impact and explosion cratering*. N.Y. Pergamon press, -1977.
34. Pike R.J. Size dependence in the shape of fresh impact cratering on the moon. -In: *Impact and explosion cratering*. N.Y. Pergamon press, -1977. -p.489-511.
35. Jansa L., Robertson B., Pe-Piper G. Montagnais. The first discovery of a submarine impact structure. // *Meteoritics*, -1986, -vol.21, -№4, -p.406.
36. Kyte F.T., Zhou Z., Wasson J.T. // *Nature*, -1981, -vol.293, -p. 417.
37. Kyte F.T., Zhou Z., Wasson J.T. // *Science*, -1988, -vol.241, -p.63.
38. Margolis S.V., Claeys P., Kyte F.T. Microtektites, microkrystites and spinels from a Late Pliocene asteroid impact in the Southern Ocean. // *Science*, -1991, -vol.251, -p. 1594-1597.
39. Дитц Р.С. Астроблемы: древние структуры на Земле, образованные ударом метеоритов. // *Взрывные кратеры на Земле и планетах*. М:Мир, -1968, -с.153-173.
40. Болдуин Р.Б. Древние метеоритные кратеры и криптовулканические структуры. // *Взрывные кратеры на Земле и планетах*. М:Мир, -1968, -с.130-152.
41. Денс М.Р. Внеземное происхождение канадских кратеров. // *Взрывные кратеры на Земле и планетах*. М:Мир, -1968, -с.105-129