

УДК 539.8; 551.1/.4; 525.23

## РОЛЬ КУМУЛЯЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ПРОЦЕССЕ ОБРАЗОВАНИЯ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК

В. А. Симоненко, Н. И. Шишкин

Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики, 456770 Снежинск

Обсуждается возможный механизм образования кимберлитовых трубок. Показано, что они могут образоваться при ударе крупного космического тела о Землю в области антипода месту удара в процессе фокусировки поверхностных сейсмических волн. Установлено, что схождение поверхностной волны к области антипода сопровождается увеличением амплитуды и возрастанием плотности энергии в ней. При фокусировке такой волны происходит почти вертикальный разрыв земной коры и образуется расширяющийся к поверхности канал разрушения — трубка взрыва. По такому каналу кимберлитовая магма, дополнительно подогретая за счет глубинной фокусировки других волн, поднимается к поверхности Земли, образуя кимберлитовую трубку. Отсутствие идеальной цилиндрической симметрии, обусловленное неоднородностью земной коры на пути распространения волны, приводит к ее дефокусировке, формированию нескольких центров схождения, т. е. к образованию поля трубок.

**Ключевые слова:** кимберлитовые трубки, кумуляция сейсмических волн, антиподы, разрушение горных пород.

**Введение.** В идеальном случае сходящейся цилиндрической волны в упругой среде происходит неограниченный рост амплитуды и плотности энергии в ней. В отечественной литературе такие явления получили название кумулятивных [1]. Кумуляция энергии при схождении волны к центру или оси фокусировки имеет место и в реальных средах, что характерно также для сходящихся сейсмических волн Рэлея и Лява, так как в окрестности осей их фокусировки движение становится осесимметричным.

Благоприятные условия для кумуляции сейсмических поверхностных волн создаются при ударах достаточно крупных космических тел о Землю. Поверхностные волны, порождаемые ударом, фокусируются в области, диаметрально противоположной месту удара, — области антипода. Рост плотности энергии в волне по мере ее схождения приводит к разрушению пород земной коры вблизи оси фокусировки. Можно ожидать геофизических последствий этих явлений, в частности, образования таких геологических структур, как кимберлитовые трубки (КТ) или другие трубки взрыва.

Кимберлитовые трубки являются разновидностью трубок взрыва, или диатрем, и представляют собой воронкообразные вертикальные каналы в земной коре, заполненные породами глубинного происхождения. Поперечные сечения их бывают округлой, удлиненной или неправильной формы площадью от  $10^2$  до  $1,4 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>. С увеличением глубины площадь сечения уменьшается, и на глубинах 1 ÷ 3 км трубки обычно переходят в дайки — пластообразные крутопадающие тела большой протяженности и малой толщины [2]. Дайки служат подводными каналами для трубок и связывают их с глубинными разломами Земли.

Как правило, КТ располагаются на щитах (кратонах) древних платформ — самых прочных участках земной коры, ближе к блокам коры, горные породы которых обладают густой, изометрично ориентированной тектонической трещиноватостью. В пределах ким-

берлитовой провинции трубки группируются в кимберлитовые поля, характерные размеры которых составляют от единиц до десятков километров. В пределах одного поля может находиться от трех до нескольких десятков трубок. Например, в Центрально-Сибирской кимберлитовой провинции Малоботуобинское поле насчитывает 9 трубок, Далдынское поле — 55 трубок [2]. Расстояние между трубками составляет от сотен метров до нескольких километров.

Кимберлит является ультраосновой горной породой порфировой структуры, в состав которой входят пиропосодержащие породы: перидотиты, пироксены и др. Перидотиты являются главными составляющими вещества мантии Земли [3]. Кимберлитовые породы, заполняющие трубки и подводящие дайки, помимо экономической ценности (месторождения алмазов) представляют значительный научный интерес. Они содержат информацию о происхождении алмазов, составе пород и термодинамических условиях в верхней мантии Земли.

Кимберлитовые трубки имеют следующие особенности [2, 4]. Верхняя часть трубок (раструб) имеет форму усеченного конуса, повернутого широким основанием к дневной поверхности, которая существовала к моменту образования трубки. Средняя часть трубки имеет близкое к круговому сечению, медленно сужающееся с увеличением глубины. Нижняя, корневая часть имеет не столь регулярное строение. Ее поперечное сечение с увеличением глубины уменьшается, трубка сплющивается и на глубине 1 ÷ 3 км переходит в подводящие дайки. Первоначально горизонтальные слои пород вблизи трубки бывают изогнутыми вверх, вниз или остаются горизонтальными. В прилегающей к трубке контактной зоне породы расчленены системами вертикальных, концентрических и радиальных трещин, распространяющихся на расстояние нескольких (иногда десятков) метров от контакта. Внедрившийся в трещины кимберлит образует апофизы — тонкие жилоподобные ответвления.

Кимберлиты в трубках преимущественно представляют собой брекчии, т. е. состоят из сцементированных обломков различных пород, в то время как в подводящих дайках и силлах (пластообразных внедрившихся образованиях) они являются массивными. Кимберлиты верхних частей трубок содержат большие скопления обломков и глыб вмещающих пород, которые, по-видимому, образовались при обрушении бортов канала и переместились вниз на несколько сотен метров, а иногда до 1 км. Глубинные ксенолиты, находящиеся в кимберлитах (оливин, гранат, диопсид, алмаз, кварц и др.), обнаруживают признаки метаморфизма — частичную или полную перекристаллизацию, изменение минерального состава и т. д. В них встречаются фазы кварца высокого давления (кюэсит, стишовит), разновидность алмаза лонсдейлит, разновидности других минералов. Еще одной важной особенностью кимберлитов в рассматриваемых геологических комплексах является отсутствие признаков термического воздействия на вмещающие породы и ксенолиты в трубках и наличие их на контактных границах даек и силлов. Это означает, что кимберлиты внедрялись в трубки в холодном состоянии [4].

Физические свойства и минералогический состав кимберлитов и содержащихся в них ксенолитов свидетельствуют о большой глубине их зарождения и скорости подъема. Лабораторные исследования мантийных пород при высоких давлениях показывают, что кимберлитовые магмы должны возникать в нижних слоях жесткой литосферы на глубинах 120 ÷ 190 км [5].

Согласно оценке в [6] скорость подъема ксенолитов по каналу трубки могла достигать 100 км/ч. Внедрение кимберлитов в трубки Южной Африки, начиная с докембрия, происходило около 1700, 1200, 100, 80 млн лет назад. В трубки Сибирской платформы внедрение кимберлитов происходило 470, 375, 325 и 200 млн лет назад, а в трубки Русской платформы — 355 млн лет назад [7]. Принято считать, что кимберлитовые трубки являются

конечными участками транспортных каналов, по которым вещество мантии поднималось на поверхность Земли.

Механизм образования КТ до настоящего времени остается неясным и является предметом дискуссий. Имеется ряд гипотез об их происхождении [2]. Перечислим основные из них.

Самая ранняя гипотеза газовзрывная [8], в соответствии с которой КТ образуются в результате ряда газовых взрывов. В [9] предполагается, что КТ образуются в результате диапирического протыкания пород, а кимберлитовые тела являются диапирами, или штоками. Авторы работы [10] считают, что диатремы образуются путем газовой абразии вмещающих пород. В [2, 8] утверждается, что КТ являются жерлами древних вулканов. Механизм образования КТ в процессе флюидизации, когда обломочный материал транспортируется быстро движущимся газожидким потоком (газ представляет собой смесь двуокиси углерода и паров воды, жидкость — обогащенная кальцитом кимберлитовая магма), обсуждается в [4]. В [11] также рассматривался механизм образования КТ путем флюидного брекчирования. Под флюидным брекчированием авторы [11] понимают совокупность процессов, играющих, по их мнению, важную роль в образовании трубок: гидравлическое дробление и раздвигание окружающих пород внедряющимся жидким или газожидким кимберлитом; адсорбционное уменьшение прочности и стрессовая коррозия окружающих пород, вызываемые флюидом кимберлита и ведущие к разрушению пород; газовая и газожидкостная абразия вмещающих пород. (Под стрессовой коррозией понимается коррозия на границах сред, обусловленная наличием напряжений.) Кроме того, авторы [11] считают, что одним из определяющих факторов образования КТ является трещиноватость окружающих пород, существовавшая до заполнения.

Согласно [12, 13] диатремы образуются в результате воздействия восходящих растворов, которые частично растворяют вмещающие породы вдоль субвертикальных каналов, что приводит к обрушению блоков пород и формированию трубок. По мнению авторов работ [2, 14], движущим агентом, осуществляющим перемещение вверх материала, заполняющего трубки, является водяной пар, возникающий при достижении магмой кимберлита горизонтов земной коры, насыщенных водой.

Из приведенного краткого обзора следует, что все указанные механизмы, предположительно приводящие к образованию КТ, являются постоянными в геологической истории Земли. Тектоническая трещиноватость горных пород коры развита повсеместно, наличие расплавленной магмы, насыщенной газами, в верхней мантии доказывается деятельностью вулканов. Стрессовая коррозия, адсорбционное уменьшение прочности, растворение горных пород — непрерывно действующие процессы.

На первый взгляд КТ должны постоянно образовываться в земной коре. Однако найденные к настоящему времени трубки имеют возраст не менее 59 млн лет [4]. Как следует из геологических данных, образование КТ происходило в определенные промежутки времени, разделенные длительными периодами “молчания”. Перечисленные гипотезы не объясняют, почему КТ не возникают в современную геологическую эпоху.

Каналы КТ в масштабах континентальных блоков являются тончайшими “проколами” земной коры. Нет оснований считать, что они образовались в коре при ее формировании. По-видимому, по некоторым причинам время от времени должен “включаться” механизм их возникновения. В течение длительного времени после образования такие каналы обладают повышенной проницаемостью и представляют собой потенциальные пути для выхода глубинных пород. При достижении определенных условий мантийные породы устремляются в них, наполняя и образуя тело трубок. В основе механизма образования каналов могут лежать волновые процессы, обусловленные ударами достаточно крупных космических тел, что характерно при смене геологических эпох.

Зоны с интенсивной трещиноватостью, имеющие форму удлиненных округлых конусов, образуются при фокусировке интенсивных поверхностных сейсмических волн. Такие волны возникают при ударе о Землю достаточно крупных космических тел: астероидов, комет, а также их фрагментов. Распространяясь вдоль поверхности Земли, эти волны фокусируются в области, диаметрально противоположной месту удара, — области антипода. В этой области создаются вертикально ориентированные разрушения пород земной коры, представляющие собой заполненные ослабленными породами потенциальные каналы, по которым кимберлитовая магма может подниматься к поверхности Земли.

Причиной формирования каналов разрушения в горной породе является нарастание напряжений в сходящейся поверхностной волне (волне Рэлея) и образование разрывов при ее фокусировке. Следует отметить, что аналогичные кумулятивные явления имеют место, например, при фокусировке сходящихся акустических и ударных волн, при выходе волн цунами на береговой шельф, при сжатии конической оболочки в кумулятивном снаряде и т. д. (см., например, [1]).

Порода, разрушенная сходящимися волнами, обладает повышенной проницаемостью для флюидов из верхней мантии. При этом нарушается существовавшее до фокусировки волны равновесие между литостатическими напряжениями, с одной стороны, и весом столба породы и силами его сцепления с окружающей средой — с другой. В дальнейшем часть разрушенных пород, не сдерживаемая силами сцепления, выносится наверх поднимающимся флюидом кимберлита.

В данной работе рассматривается фокусировка поверхностных волн Рэлея ( $R$ -волн), играющих, по-видимому, основную роль в иницировании процесса образования КТ.

### **Параметры сходящейся волны Рэлея при ударе космического тела о Землю.**

Количественную оценку параметров волны Рэлея, сходящейся к точке антипода, можно получить, используя аналогию высокоскоростного удара и взрыва. По характеру протекающих механических процессов эти явления близки. Поэтому в некотором приближении можно считать, что удар аналогичен эффективному взрыву с определенной энергией и глубиной заложения. Этот вопрос требует проведения дополнительных исследований. В настоящей работе ограничимся лишь грубыми оценками, определяющими исходные параметры поверхностной волны.

Доля энергии удара  $E_s$ , переходящая в сейсмическую энергию, пропорциональна кинетической энергии ударяющего тела:  $E_s = k_s E_k$  ( $E_k$  — кинетическая энергия ударяющего тела;  $k_s = 10^{-3} \div 10^{-5}$  — сейсмическая эффективность удара, т. е. доля энергии удара, перешедшая в энергию сейсмического движения). Обычно принимается  $k_s = 10^{-4}$  [15]. Сейсмическая эффективность взрыва зависит от вида грунта, в котором он происходит, и составляет от 0,1 % для аллювия до 5 % для гранита [16]. В данном случае в качестве сейсмической эффективности взрыва в указанном диапазоне выберем среднее значение  $k_{s,exp} = 10^{-2}$ . Таким образом, будем считать, что сейсмическая эффективность удара примерно в 100 раз меньше сейсмической эффективности взрыва. Приведенная оценка весьма грубая, поэтому в дальнейшем параметр  $k_s$  должен быть определен более точно.

Сделаем еще одно допущение, полагая, что распределение энергии между объемными и поверхностными волнами при ударе и взрыве одинаково. По-видимому, это предположение также приводит к некоторому занижению интенсивности  $R$ -волны, поскольку даже из качественного анализа следует, что удар космического тела о Землю является более эффективным генератором поверхностных волн, чем подземный взрыв.

Сейсмические поверхностные волны открыты Рэлеем [17]. Сведения об их свойствах содержатся также в [18, 19] и других работах. Ниже приведены лишь некоторые из них.

1. Движение среды в  $R$ -волне происходит в приповерхностном слое, толщина которого имеет величину порядка длины волны  $\lambda$ .

2. Частицы среды движутся по эллиптическим траекториям, так что на фронте волны они начинают смещаться в сторону источника волны.

3. Амплитуда волны, генерируемой сосредоточенным источником, уменьшается с увеличением расстояния  $r$ , пройденного волной, по закону  $r^{-1/2}$ .

4. С увеличением глубины  $z$  амплитуда смещения уменьшается следующим образом. Горизонтальная компонента смещения убывает по линейному закону до глубины  $z \approx \lambda/4$ , при которой она меняет знак. После этого она увеличивается, а затем экспоненциально убывает. Вертикальная компонента смещения при  $0 \lesssim z \lesssim \lambda/4$  почти постоянна, а при  $z \gtrsim \lambda/4$  экспоненциально убывает. Из-за изменения знака горизонтальной компоненты смещения при  $z \gtrsim \lambda/4$  направление вращения частиц меняется на противоположное.

5. При увеличении глубины, на которой находится источник ( $z = z_0$ ), амплитуда волны уменьшается по экспоненте.

6. В случае  $R$ -волны, генерированной взрывным источником, смещение поверхности среды в зависимости от времени имеет вид одиночного волнового импульса (волнового пакета). Зависимости амплитуды колебаний от расстояния до эпицентра и глубин, на которых находятся точка наблюдения и источник, а также вид траекторий частиц качественно такие же, как и для гармонической волны, основной период которой приблизительно равен длительности импульсной  $R$ -волны.

7. Движение в  $R$ -волне, распространяющейся вдоль поверхности однородного идеально упругого шара, приближенно симметрично относительно сечения большого круга, перпендикулярного оси, проходящей через источник и его антипод. На участке между источником и окружностью большого круга амплитуда  $R$ -волны убывает по закону  $r^{-1/2}$  ( $r$  — расстояние от источника, отсчитываемое вдоль поверхности шара). После прохождения волной окружности большого круга по мере приближения к точке антипода амплитуда возрастает по тому же закону  $r^{-1/2}$ , но теперь  $r$  представляет собой расстояние вдоль поверхности шара от фронта волны до точки антипода. Кроме того, фаза колебаний вертикальной компоненты около антипода сдвигается на  $180^\circ$  относительно фазы колебаний вблизи источника, что подтверждается данными, представленными на рис. 1, 2, взятых из работы [18]. На рис. 1 приведены зависимости смещений в  $R$ -волне от времени в двух точках поверхности однородного упругого шара радиуса  $a = 6400$  км, расположенных симметрично относительно сечения большого круга и удаленных от источника и его антипода на расстояние, равное 1100 км. При этом угловое расстояние составляет  $\theta = 10^\circ$ . На рис. 2 показаны траектории частиц в указанных точках. Источник — взрыв, генерирующий продольную  $P$ -волну. Источник находится на глубине  $z_0 = 1$  км от поверхности шара.

На рис. 1 по оси абсцисс отложено безразмерное время  $c_s t/a$  ( $a$  — радиус шара (Земли);  $c_s$  — скорость распространения поперечных  $S$ -волн в среде;  $t$  — время, отсчитываемое с момента взрыва). По оси ординат отложены вертикальная ( $U_R$ ) и горизонтальная ( $U_\theta$ ) компоненты смещения, измеряемые в масштабе  $A^3/a^2$  ( $A$  — параметр, имеющий размерность длины). Используется сферическая система координат  $(R, \theta, \varphi)$ . Движение предполагается осесимметричным.

Значение параметра  $A$  в [18] не приводится. Сравнивая значение функции источника, использованное в [18], с полученным в [16] для подземного ядерного взрыва, имеем  $A \approx 5 \cdot 10^3$  м. В этом случае масштабный множитель  $A^3/a^2 \approx 3 \cdot 10^{-3}$  м, чему соответствует энергия взрыва  $E_0 \approx 7,5 \cdot 10^{20}$  Дж. Данные на рис. 1,б и рис. 2,б можно использовать в качестве начальных параметров для сходящейся  $R$ -волны при изучении ее дальнейшего схождения к антиподу.

Из рис. 1, 2 следует, что траектории частиц в  $R$ -волне мало отличаются от круговых, т. е. амплитуды компонент смещения примерно равны:  $|U_\theta/U_R| \approx 0,8$ . Поэтому в

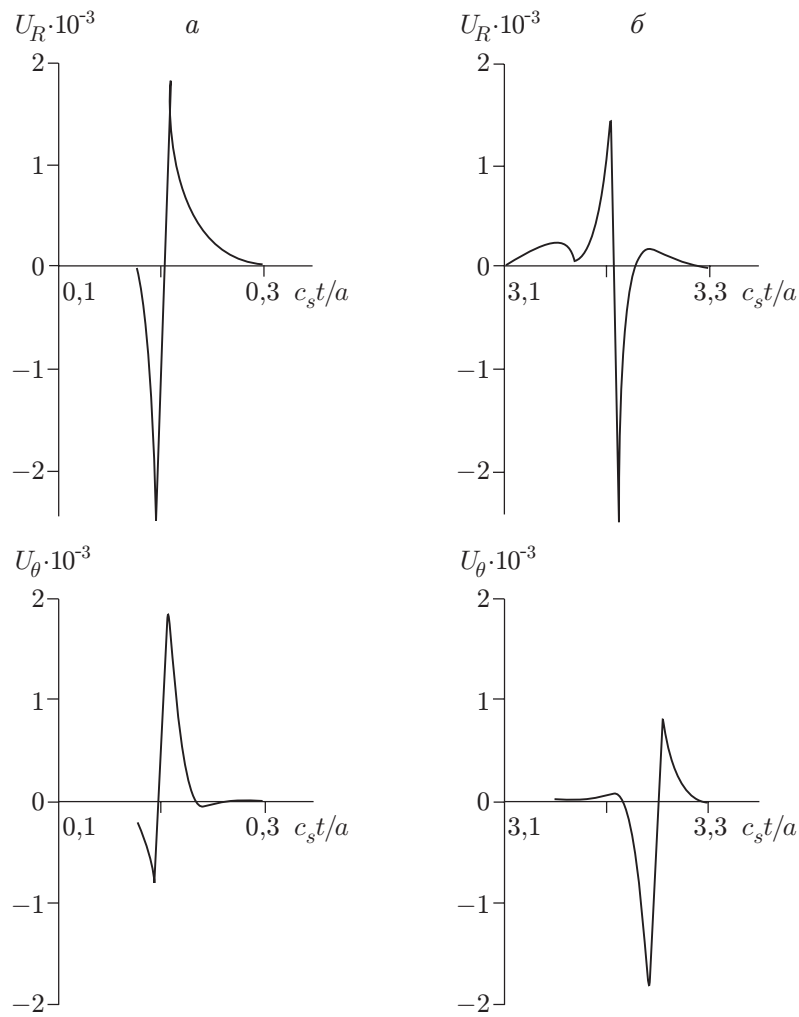


Рис. 1. Зависимости смещения поверхности Земли в волне Рэля от времени вблизи источника (а) и антипода (б)

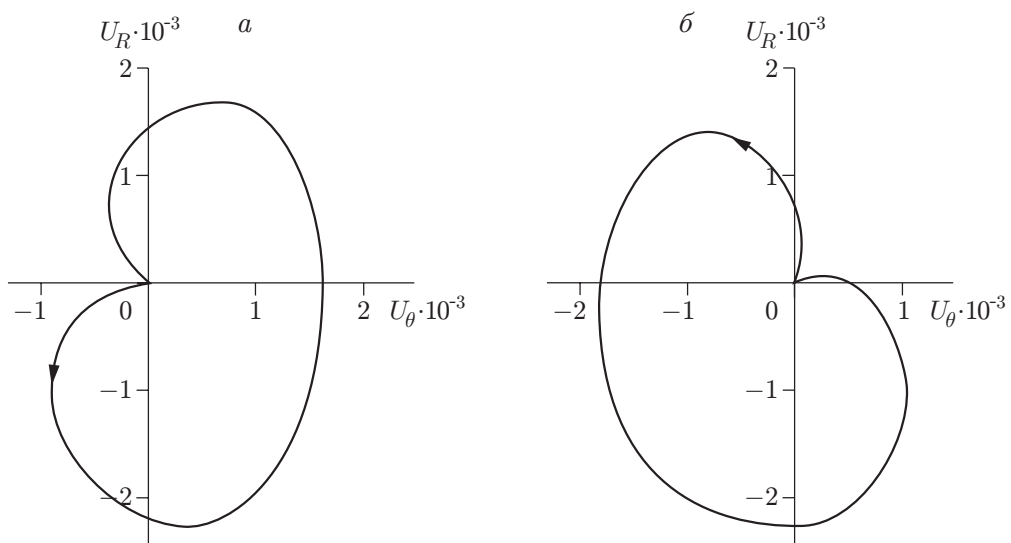


Рис. 2. Траектории частиц среды в волне Рэля вблизи источника (а) и антипода (б)

дальнейшем в качестве амплитуды  $R$ -волны принимается любая из них или, например, их полусумма  $U = (U_R + U_\theta)/2$ . В качестве длины волны примем величину  $\lambda = c_s T$  ( $T$  — удвоенный интервал времени  $\Delta t$  между главными экстремумами на кривой зависимости смещения от времени).

В окрестности антипода будем использовать локальную цилиндрическую систему координат  $(r, z, \varphi)$  с началом отсчета в точке антипода  $A$ . Ось  $z$  направлена к центру шара, плоскость значений  $r$  лежит в плоскости, касательной к шару в точке  $A$ . При этом  $r > 0$ ,  $z \geq 0$ ,  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ .

Из геометрии задачи и характера движения  $R$ -волны вдоль поверхности шара следует, что вблизи антипода она представляет собой цилиндрическую сходящуюся волну, причем движение не зависит от угловой координаты  $\varphi$ . Осью фокусировки волны является прямая, проходящая через точку удара и точку антипода.

Амплитуды смещения  $u$  и скорости смещения  $v$  для точек, расположенных на поверхности Земли в окрестности антипода, можно представить в виде

$$u = u_1(r_1/r)^{1/2}, \quad v = v_1(r_1/r)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $r$  — расстояние от точки антипода до фронта волны;  $u_1, v_1$  — амплитуды смещения и скорости в точке  $r = r_1$ .

В качестве начальных значений  $u_1$  и  $v_1$  возьмем амплитуды волны Рэлея, вычисленные в [18] при расстоянии от точки антипода  $r_1 \approx 1100$  км. Характерные значения  $u_1$  и интервал  $\Delta t$  между соседними экстремумами зависимости  $u = u(t)$  определяются по рис. 1,б и рис. 2,б:  $u_1 \simeq 7,5$  м;  $\Delta t \approx 0,02a/c_s \approx 36$  с. Зная  $\Delta t$ , находим период колебаний  $T = 2\Delta t \simeq 72$  с и, принимая скорость поперечных волн  $c_s \simeq 3,55$  км/с, получаем  $\lambda = c_s T \simeq 250$  км. Скорость смещения оценивается по формуле  $v_1 = 2u_1/\Delta t \simeq 0,04$  м/с.

Напряженное состояние среды определяется тензором напряжений  $\hat{\sigma}$ :

$$\hat{\sigma} = \sigma_r \mathbf{n}_r \mathbf{n}_r + \sigma_z \mathbf{n}_z \mathbf{n}_z + \sigma_\varphi \mathbf{n}_\varphi \mathbf{n}_\varphi + \sigma_{rz} \mathbf{n}_r \mathbf{n}_z.$$

Здесь  $\mathbf{n}_r, \mathbf{n}_z, \mathbf{n}_\varphi$  — орты цилиндрической системы координат, привязанной к точке антипода.

Амплитуды тензора напряжений в сходящейся  $R$ -волне имеют один и тот же порядок величины. Поэтому оценку напряжений будем производить по значению компоненты  $\sigma_\varphi$  напряжений, вызывающих возникновение радиальных трещин в среде при фокусировке  $R$ -волны:

$$\sigma_\varphi = 2\rho c_s^2 \left( \frac{u_r}{r} + \frac{\nu}{1-2\nu} \operatorname{div} \mathbf{u} \right).$$

Здесь  $\mathbf{u} = u_r \mathbf{n}_r + u_z \mathbf{n}_z$  — вектор смещения.

В выражении для  $\operatorname{div} \mathbf{u}$  значения производной  $\partial u_z / \partial z$  малы в соответствии с приведенными выше свойствами  $R$ -волны, поэтому

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \approx \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \equiv \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r}.$$

С учетом сделанного ранее замечания о близости значений  $u_r$  и  $u_z$  будем рассматривать только компоненту  $u_r$ , опуская для краткости индекс. Тогда рост амплитуды напряжений в сходящейся  $R$ -волне приближенно определяется выражением

$$\sigma_\varphi \approx 2\rho c_s^2 \left[ \frac{u}{r} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right) \right] \approx \rho c_s^2 \frac{2-3\nu}{1-2\nu} \frac{u_1}{r_1} \left( \frac{r_1}{r} \right)^{3/2} = \sigma_1 \left( \frac{r_1}{r} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_1 = \rho c_s^2 [(2-3\nu)/(1-2\nu)] u_1 / r_1$ .

При оценке параметров волны Рэлея используем следующие усредненные характеристики земной коры: плотность  $\rho = 2,84$  г/см<sup>3</sup>, скорость распространения продольных волн

$T$ , с	$c_R$ , км/с	$\lambda$ , км	$Q \cdot 10^{-2}$	$\alpha \cdot 10^4$ , км $^{-1}$	$\exp(2 \cdot 10^4 \alpha)$
12	3,10	37	5,10	1,67	28,0
23	3,10	71	3,10	1,40	16,4
43	3,60	155	2,50	0,81	5,1
72	3,80	270	1,25	0,92	6,2
108	3,75	400	1,00	0,78	4,8
215	3,70	800	0,94	0,42	2,3

$c_l = 6,30$  км/с, скорость распространения поперечных волн  $c_s = 3,55$  км/с, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,27$ , толщина земной коры  $H = 33$  км. Тогда для рассматриваемого реперного взрыва на расстоянии от точки антипода  $r = r_1 = 1100$  км характерное значение напряжения в сходящейся поверхностной волне составит  $\sigma_\varphi|_{r=r_1} = \sigma_1 = 0,65$  МПа.

С использованием полученных характерных значений величин для взрыва вычислим значения параметров  $R$ -волны  $u_1$ ,  $v_1$ ,  $\sigma_1$  при  $r_1 = 1,1 \cdot 10^6$  м и  $z_0 = 10^3$  м в случае удара с кинетической энергией ударяющего тела  $E_k = 4,2 \cdot 10^{18}$  Дж. При этом будем учитывать, что согласно сделанному предположению сейсмическая эффективность удара примерно в 100 раз меньше сейсмической эффективности взрыва, т. е. линейные и временные масштабы необходимо уменьшить в  $(180 \cdot 100)^{1/3} \approx 26$  раз. Тогда для приведенных масштабов получаем

$$\begin{aligned} \bar{u}_1 &= 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ м/Дж}^{1/3}, & \bar{v}_1 &= 0,40 \text{ м/с}, & \sigma_1 &= 0,65 \text{ МПа}, \\ \bar{\lambda}_1 &= 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ м/Дж}^{1/3}, & \bar{T} &= 1,68 \cdot 10^{-6} \text{ с/Дж}^{1/3} \\ \text{при } \bar{r}_1 &= 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м/Дж}^{1/3}, & \bar{z}_0 &= 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ м/Дж}^{1/3}, \end{aligned} \quad (3)$$

а для произвольной энергии  $E$ , выраженной в джоулях, имеем

$$\begin{aligned} u_1 &= 1,8 \cdot 10^{-7} E^{1/3}, \text{ м}, & v_1 &= 0,40 \text{ м/с}, & \sigma_1 &= 0,65 \text{ МПа}, \\ \lambda_1 &= 6 \cdot 10^{-3} E^{1/3}, \text{ м}, & T &= 1,68 \cdot 10^{-6} E^{1/3}, \text{ с} \\ \text{при } r_1 &= 2,5 \cdot 10^{-2} E^{1/3}, \text{ м}, & z_0 &= 2,3 \cdot 10^{-6} E^{1/3}, \text{ м}. \end{aligned} \quad (4)$$

**Оценка диссипации энергии.** Амплитуда  $R$ -волны уменьшается не только из-за геометрического расхождения, но и вследствие рассеяния на неоднородностях и внутреннего трения в среде. При малом отличии свойств вещества земной коры от свойств идеально упругого тела общее ослабление амплитуды волны может быть оценено введением в формулы (1), (2) дополнительного множителя вида  $\exp[-\alpha(T)l]$ , где  $\alpha(T)$  — коэффициент затухания для колебаний с периодом  $T$ ;  $l$  — расстояние, пройденное волной. Коэффициент  $\alpha$  выражается через диссипативную функцию  $Q^{-1}$  ( $Q$  — механическая добротность колебательной системы), групповую скорость  $c_R$  волнового пакета и период колебаний  $T$  по известной формуле

$$\alpha = \pi/(c_R T Q). \quad (5)$$

Для пород земной коры  $Q$  и  $c_R$  также являются функциями  $T$ . Зависимости  $Q(T)$  и  $c_R(T)$  для основной гармоники волны Рэлея в континентальной коре рассчитаны в [19]. Результаты расчета коэффициента  $\alpha$  по формуле (5) с использованием данных из [19] представлены в таблице. Данные, приведенные в последней графе таблицы, показывают, во сколько раз уменьшится амплитуда  $R$ -волны на пути от места удара до антипода ( $l = 2 \cdot 10^4$  км). Например,  $R$ -волна с периодом  $T = 43$  с и длиной волны  $\lambda = 155$  км ослабляется в 5 раз, а волна с  $\lambda = 800$  км — в 2,3 раза. Таким образом, вследствие диссипативных потерь закон геометрического подобия для ударов разного масштаба нарушается. В зависимости



от силы удара для каждого удара необходимо вводить поправку в параметры волны, что можно сделать с использованием данных таблицы.

С учетом диссипативных потерь формулы для амплитудных параметров сходящейся  $R$ -волны принимают вид

$$\begin{aligned} u &= u_1(r_1/r)^{1/2} \exp[-\alpha(\pi a - r)], & v &= v_1(r_1/r)^{1/2} \exp[-\alpha(\pi a - r)], \\ \sigma &= \sigma_1(r_1/r)^{3/2} \exp[-\alpha(\pi a - r)], \end{aligned} \quad (6)$$

где коэффициент ослабления  $\alpha = \alpha(T)$  определяется выражением (5);  $a$  — радиус Земли. В окрестности антипода  $r \ll \pi a$ , поэтому, пренебрегая вторым слагаемым в показателе экспоненты, получаем

$$\begin{aligned} u &= u_1(r_1/r)^{1/2} \exp[-\alpha(T)\pi a], & v &= v_1(r_1/r)^{1/2} \exp[-\alpha(T)\pi a], \\ \sigma &= \sigma_1(r_1/r)^{3/2} \exp[-\alpha(T)\pi a], \end{aligned} \quad (7)$$

где значения параметров  $u_1, v_1, \sigma_1, T, r_1$  определяются выражениями (4).

**Разрушение горной породы в окрестности антипода.** Волна Рэлея движется по поверхности Земли к антиподу в виде кольцевого вала, диаметр  $2r$  которого уменьшается и при фокусировке обращается в нуль. Высота вала (амплитуда смещения поверхности) растет по закону  $r^{-1/2}$ , напряжение и деформации увеличиваются по закону  $r^{-3/2}$ , а плотность упругой энергии — как  $r^{-3}$  при  $r \rightarrow 0$ . При этом движение в приповерхностном слое Земли распространяется на глубину, примерно равную длине  $R$ -волны. Таким образом, к оси фокусировки сходится сейсмическое возмущение в виде цилиндрической волны. На фронте волны грунт начинает двигаться от оси фокусировки. Он растягивается в радиальном, азимутальном и вертикальном направлениях. По мере схождения волны вследствие роста напряжений на некотором расстоянии от оси фокусировки  $r = r_*$  напряжения превышают предел прочности грунта, и он начинает растрескиваться, разрушаться.

Система трещин, возникшая на расстоянии  $r = r_*$ , продвигается вместе с волной к оси фокусировки, а граница  $r = r_*$  при этом отстает в противоположном направлении. Разбитая трещинами порода удаляется от оси. В результате вдоль оси фокусировки в течение некоторого времени существует цилиндрическая, сужающаяся с увеличением глубины полость, стенка которой состоит из разрушенных пород. Угол наклона стенки больше угла естественного откоса для разрушенных пород. Вследствие этого куски раздробленной породы падают вниз под действием гравитационной силы.

Оценим размеры зоны разрушения  $r_*$ , время существования полости  $t_*$ , радиус полости  $r_h$  и глубину падения кусков породы  $z_*$ . Пусть  $\sigma = \sigma_*$  — прочность породы на разрыв. Образование радиальных трещин на расстоянии от антипода  $r = r_*$  начнется при условии

$$\sigma = \sigma_1(r_1/r)^{3/2} \exp[-\alpha(T)\pi a] = \sigma_* + \sigma_g \quad (8)$$

( $\sigma_g = \rho g z$  — литостатическое давление на глубине  $z$ ;  $g$  — ускорение свободного падения).

Из (8) получаем

$$r_* = r_1 \left( \frac{\sigma_1 \exp[-\pi a \alpha(T)]}{\sigma_* + \rho g z} \right)^{2/3}. \quad (9)$$

Смещение  $u_*$  и скорость  $v_*$  границы  $r = r_*$  определяются соотношениями

$$u_* = u_1 \left( \frac{r_1}{r_*} \right)^{1/2} \exp[-\alpha(T)\pi a] = u_1 \left( \frac{\sigma_* + \rho g z}{\sigma_1} \right)^{1/3} \exp \left[ -\frac{2}{3} \pi a \alpha(T) \right]; \quad (10)$$

$$v_* = u_1 \left( \frac{\sigma_* + \rho g z}{\sigma_1} \right)^{1/3} \exp \left[ -\frac{2}{3} \pi a \alpha(T) \right]. \quad (11)$$

Максимальный радиус полости на уровне свободной поверхности можно оценить на основе закона сохранения массы. Порода, сместившаяся с границы  $r = r_*$  в слое единичной толщины, освобождает объем, равный  $2\pi r_* u_*$ , который в свою очередь равен объему полости вблизи оси фокусировки  $\pi r_h^2$ . Из этого условия с использованием соотношений (9) и (10) получаем

$$r_h = 2(r_* u_*)^{1/2} = 2(r_1 u_1)^{1/2} (\sigma_1 / \sigma_*)^{1/6} \exp[-(2/3)\pi a \alpha(T)]. \quad (12)$$

Время существования полости приблизительно равно длительности фазы растяжения в  $R$ -волне:

$$t_* = 2u_*/v_* = 2u_1/v_1 = 10^{-6} E^{1/3}, \text{ с.} \quad (13)$$

Разрушенная трещинами порода при расширении полости рассыпается на куски, которые падают вниз до тех пор, пока сдвигающиеся стенки полости не заклинят их на некоторой глубине  $z_*$ . За время  $t_*$  куски упадут на глубину

$$z_* = gt_*^2/2 = 2g(u_1/v_1)^2 = 0,5 \cdot 10^{-12} g E^{2/3}. \quad (14)$$

ПРИМЕР. Пусть космическое тело плотностью  $\rho = 2750 \text{ кг/м}^3$  и радиусом  $r_0 = 1 \text{ км}$  соударяется с Землей со скоростью  $V = 20 \text{ км/с}$ . Его кинетическая энергия

$$E = mV^2/2 = (4/3)\pi \rho r_0^3/2 = 2,3 \cdot 10^{21} \text{ Дж.}$$

В соответствии с (4) период колебаний в  $R$ -волне, порожденной ударом,  $T = 23 \text{ с}$ . Ему соответствует длина волны  $\lambda = 71 \text{ км}$ . В таблице находим коэффициент ослабления  $\alpha = \alpha(T) = \alpha(23) = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}$  и экспоненциальный множитель  $\exp[\pi a \alpha(T)] = \exp[2 \times 10^4 \alpha(T)] = 16,4$ .

Характерное значение прочности горных пород на растяжение  $\sigma_* \approx 30 \text{ МПа}$ . Тогда с учетом (4) и соотношений (9)–(14) радиус зоны разрушений вблизи поверхности ( $z \approx 0$ )  $r_* \simeq 4180 \text{ м}$ , смещение границы разрушения  $u_* \simeq 1,37 \text{ м}$ , скорость границы разрушения  $v_* \simeq 0,224 \text{ м/с}$ , радиус полости  $r_h \simeq 106 \text{ м}$ , время существования полости  $t_* \simeq 12,3 \text{ с}$ , глубина падения обломков  $z_* \simeq 740 \text{ м}$ .

Рассматриваемый процесс (образование конической области растрескавшейся горной породы и полости) происходит на глубине менее четверти длины волны Рэлея. Ниже этого уровня действие волны начинается с фазы сжатия, т. е. вещество движется к оси фокусировки и сжимается. Для исследования этой области движения модель упругого тела не подходит. Необходимо учитывать пластические свойства горных пород земной коры. Опишем качественно происходящие в дальнейшем процессы.

По окончании фазы растяжения выше уровня  $z \approx \lambda/4$  горная порода начинает двигаться к оси фокусировки и сжимается. Происходит ее дальнейшее разрушение, при этом возможен переход в пластическое состояние. Закон схождения волны изменяется, но концентрация энергии вблизи оси фокусировки продолжает увеличиваться, хотя и в меньшей степени, чем в упругой волне [1]. При этом возможно формирование течения грунта в виде струи, направленной вверх, приводящее к выбросу грунта из области, прилегающей к оси фокусировки. В то же время ниже уровня  $z \approx \lambda/4$  вещество начинает растягиваться. Это может привести к его разрушению и образованию полости в виде конуса, расширяющегося с увеличением глубины. Нижняя полость, как и верхняя, существует в течение времени  $t_* \simeq 10^{-6} E^{1/3}$ . Ее закрытие может привести к подъему пород коры вверх.

При достаточно большой энергии удара и, следовательно, достаточно большой длине волны  $\lambda$  труба разрушенных пород коры может проникнуть в мантию. Образовавшийся канал разрушенной породы является тем первичным каналом, через который в дальнейшем мантийное вещество в виде кимберлитовой магмы может подняться к поверхности Земли и образовать кимберлитовую трубку.

Следовательно, условием образования КТ является следующее: длина сходящейся к антиподу  $R$ -волны должна быть больше толщины земной коры. Используя для длины волны выражение из (4), получаем, что кинетическая энергия ударяющего тела должна составлять

$$E \gtrsim 4,6 \cdot 10^6 H^3, \text{ Дж},$$

где  $H$  выражено в метрах.

**Влияние неоднородности Земли.** Полученные приближенные оценки параметров сходящейся  $R$ -волны и ее воздействия на породы земной коры в окрестности антипода справедливы для однородного упругого шара. Земной шар неоднороден: плотность и скорости распространения сейсмических волн в основном возрастают с увеличением глубины. Вследствие этого сейсмические лучи  $P$ - и  $S$ -волн, идущие от места удара, искривляются. Часть из них отражается от границы мантии и вновь попадает в слой земной коры. Другая часть движется в сторону свободной поверхности и отражается от нее. При каждом отражении возникают новые  $P$ - и  $S$ -волны, а также поверхностные  $R$ -волны. Число отраженных волн растет в геометрической прогрессии. Они интерферируют, так что существенная часть энергии движения концентрируется вблизи свободной поверхности в приповерхностном волноводе. В результате в слое коры формируются системы поверхностных интерференционных волн: волны Рэлея, Лява и др.

Как и в случае однородного шара, амплитуды поверхностных волн, распространяющихся от источника до сечения большого круга, уменьшаются вследствие геометрического расхождения. После прохождения сечения большого круга амплитуды волн увеличиваются за счет схождения.

Характер колебаний в волнах Рэлея при этом изменяется. Вместо одиночного импульса распространяется пучок квазигармонических колебаний, а за ним — нерегулярные, более высокочастотные колебания. На область антипода одна за другой будут набегать растущие по амплитуде поверхностные волны. Их суммарное воздействие на породы коры, по-видимому, сильнее, чем в случае однородного шара.

В силу некоторой несферичности Земли и азимутально-широтной неоднородности трасс распространения поверхностных сейсмических волн будет происходить деформация их фронтов и возникать угловая неоднородность амплитуд. Фронт сходящейся волны может принять достаточно сложную форму, и фокусировка такого фронта может происходить вдоль нескольких осевых линий. Вероятно, фокусировка последующих  $R$ -волн в пути будет происходить в местах, не совпадающих с местами фокусировки предыдущих. В результате в окрестности антипода может возникнуть семейство каналов разрушенных горных пород. При внедрении в них магмы кимберлита может образоваться поле КТ.

Внедрение магмы кимберлита по образовавшимся каналам разрушения облегчается и стимулируется не только поверхностными волнами. В более глубоких областях мантии, прилегающих к оси, проходящей через место удара и его антипод, фокусируется большое число других сейсмических волн. Их столкновение и взаимодействие с породами земной коры и мантии приводят к эффективной диссипации сейсмической энергии и переходу ее в тепло. Даже незначительное повышение температуры горных пород увеличивает их подвижность, ускоряет процессы перекристаллизации с выделением тепла [3]. По-видимому, именно эти глубинные процессы обуславливают подвижность мантийного вещества в основании кимберлитовых провинций. Последующее движение этого вещества вверх и по нормали к оси антипода приводит к последовательному заполнению каналов разрушения, созданных ранее при более слабых ударах. Предложенный сценарий является гипотетическим. Для его обоснования необходимы дополнительные исследования.

**Заключение.** Механизм образования КТ, рассмотренный в настоящей работе, позволяет объяснить многие особенности морфологии трубок и вмещающих пород, например,

формы трубок, наличие на глубине обломочного материала верхних слоев вмещающих пород, брекчированность кимберлитов, метаморфизм ксенолитов, возникновение полей трубок и пр. Предлагаемый сценарий образования КТ допускает простираание каналов разрушения до мантии Земли, захват и продвижение мантийного вещества (кимберлита) по созданному  $R$ -волной каналу к дневной поверхности. Кумуляция поверхностных сейсмических волн является общим механизмом, инициирующим образование не только кимберлитовых, но и некоторых других видов диатрем.

Можно ожидать, что полей КТ на Земле столько же, сколько больших ударных кратеров и кольцевых структур, а количество диатремных полей определяется числом более слабых ударов. Существенная часть диатремных полей могла быть замаскирована активными геологическими процессами.

В антиподе областей известных алмазоносных провинций с учетом глобальных тектонических движений должны располагаться астроблемы и кольцевые структуры. Однако обнаружение их является непростой задачей, так как при этом необходимо учитывать движения земной коры. На современных картах Южно-Африканской алмазной провинции соответствует район Тихого океана к югу от Гавайских островов, Якутской провинции — район моря Уэддэлла у побережья Антарктиды, а Бразильской — район Тихого океана между Филиппинскими и Марианскими островами.

Изложенные в настоящей работе аргументы позволяют утверждать, что КТ и в общем случае поля диатрем являются свидетельствами и индикаторами бомбардировки Земли космическими телами. Наиболее крупные удары помимо образования конкретных полей диатрем обуславливали формирование глубинных мантийных потоков, которые в свою очередь приводили к заполнению ранее созданных каналов мантийным веществом. Представляет интерес разработка программы согласованных исследований движения земной коры, образования ударных кратеров и астроблем, генезиса диатремных полей. Результаты таких исследований могут внести существенный вклад в реконструкцию геологического прошлого Земли. Ценные результаты может дать изучение таких явлений на других планетах земной группы. На некоторых из них разрушения в антиподе ударов, по-видимому, будут выражены более ярко в силу меньшей интенсивности геологических процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Забабахин Е. И., Забабахин И. Е. Явления неограниченной кумуляции. М.: Наука, 1988.
2. Милашев В. А. Кимберлиты и глубинная геология. Л.: Недра. Ленингр. отд-ние, 1990.
3. Ферхуген Дж., Тернер Ф., Вейс Л. и др. Земля. Введение в общую геологию. М.: Мир, 1974. Т. 1, 2.
4. Доусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир, 1983.
5. Рябчиков И. Д., Расс И. Т. Расплавленные карбонаты в глубинах Земли // Природа. 1998. № 8. С. 67–74.
6. Frank F. C. Defects in diamonds // Proc. of the Intern. industr. diamond conf., Oxford, 1966. L.: Industr. Diamond Inform. Bureau, 1967. P. 119–135.
7. Белов С. В., Фролов А. А. Посланцы мантийных магм // Природа. 1998. № 11. С. 44–56.
8. Wagner P. A. Die Diamantfuhrenden gesteine Sudafricas, ihre Abban und ihre Aufbereitung. Berlin: S. n., 1909.
9. Михеенко В. И. Механизм образования кимберлитовых трубок // Докл. АН СССР. 1972. Т. 205, № 2. С. 428–430.
10. Новиков Л. А., Слободской Р. М. Механизм формирования диатрем // Сов. геология. 1978. № 8. С. 3–14.

11. **Владимиров Б. М., Костровицкий С. Н., Соловьева Л. В. и др.** Классификация кимберлитов и внутреннее строение кимберлитовых трубок. М.: Наука, 1981.
12. **Locke A.** The formation of certain ore bodies by mineralization stopping // *Econ. Geol.* 1926. V. 21. P. 431–463.
13. **Sawkins F. J.** Chemical brecciation an inrecognized mechanism for breccia formation // *Econom. Geol.* 1969. V. 64. P. 613–617.
14. **Lorenz V.** Formation of phreatomagmatic maar-diatreme volcanoes and its relevance to kimberlite diatremes. N. Y.: Pergamon Press, 1973. V. 9. P. 17–27.
15. **Мелюш Г.** Образование ударных кратеров. Геологический процесс. М.: Мир, 1994.
16. **Haskell N. A.** Analytic approximation for the elastic radiation from a contained underground explosion // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. P. 2583–2588.
17. **Lord Rayleigh (Stratt J. W.).** On waves propagation along the plane surface of the elastic solid // *Proc. London Math. Soc.* 1885. V. 17. P. 4–11.
18. **Alterman Z., Abramovici F.** Effect of the depth of a point source on the motion of the surface of an elastic solid sphere // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1966. V. 11. P. 189–224.
19. **Левшин А. Л.** Поверхностные и каналовые сейсмические волны. М.: Наука, 1973.

*Поступила в редакцию 19/XI 2002 г.,  
в окончательном варианте — 16/IV 2003 г.*

---