

**КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ  
В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ЛИТОСФЕРЫ  
(обзор проблемы)**

**Б.М. Чиков**

*Институт геологии Сибирского отделения РАН*

*630090, Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 3*

*E-mail: chikov@ngs.ru*

*Поступила в редакцию 7 апреля 2004 г.*

Спектр колебательных движений с периодичностью от суточных до высокочастотных является частью функционирования геосистем всех иерархических уровней. Короткопериодные колебания возбуждаются сильными внутрипланетными возмущениями, взаимодействием литосферных плит, атмосферными и гидросферными причинами; высокочастотные колебания сопровождают землетрясения, падение метеоритов, техногенные процессы. Колебательные режимы в определенных условиях изменяют характер проявления основных законов природы (гравитации, равенства действия и противодействия, сохранения количества движения и пр.). К основным следствиям короткопериодных колебаний в литосфере относятся вибромеханические, виброреологические и вибромехано-химические эффекты (преобразование сухого трения в вязкое, направленный массоперенос, вибрационная активация физических и химических процессов и др.). Эти эффекты играют существенную роль в процессах деформации, разрушения и структурирования литосферы, в механизмах формирования регулярно упорядоченных систем седиментации и кристаллизации магмы, протрудирования мантийных масс и перемещения блоков в коре, в кинетике метаморфизма пород, рудообразования и пр.

Ключевые слова: *колебание, волна, вибрация, энергия колебаний, колебательный режим, землетрясение, ударно-волновое взаимодействие, вибромеханические эффекты, регулярно-упорядоченные системы, виброгеомеханика, литосфера.*

**SHORT-PERIOD OSCILLATIONS IN LITHOSPHERE GEOLOGICAL PROCESSES  
(Review of the problem)**

**B.M. Chikov**

*Institute of Geology, Siberian Branch of RAS*

Spectrum of oscillations with a period from the daily to high-frequency ones is a function component of geological systems at all hierarchic levels. Short-period oscillations are initiated by inner-planet perturbations, interaction of lithosphere plates, atmosphere and hydrosphere reasons; high-frequency oscillations accompany earth-quakes, meteorite fall and man-caused processes. Under some certain conditions oscillation modes change manifestation character of the main nature laws (gravitation, equilibrium between action and counteraction, momentum conservation, etc.) The main sequences of short-period oscillations in lithosphere includes vibromechanical, vibrorheological, and vibromechano-chemical effects (transformation of dry friction into viscous friction, directed mass transfer, vibration activation of physical and chemical processes, etc.). These effects are important for deformation processes, destruction and structuring of lithosphere, formation of structurally ordered systems of magma sedimentation and crystallization, mantle mass protrusion and transportation of blocks within the crust, kinetics of rock metamorphism, ore-formation, etc.

Key words: *oscillation, wave, vibration, oscillation energy, oscillation regime, earthquake, shock-wave interaction, vibromechanic effects, regular ordered systems, vibrogeomechanics, lithosphere.*

## Введение

Периодичность и ритмичность – одна из основных характеристик геологической истории. В XIX-XX столетиях к периодическим движениям относились преимущественно медленные эпейрогенические колебания земной поверхности со скоростью первые см/год (максимально до 10-12) и периодичностью, измеряемой веками или тысячелетиями. Такие движения обеспечивают морские трансгрессии и регрессии, изменение положения береговых линий материков в связи с таянием материковых льдов, периоды оледенения или потепления климата и т.п. [Одесский, 1972; Цареградский, 1963, и др.]. Еще более продолжительны «макроколебательные» события коллизионного и плюмового магматизма с периодичностью десятки тысяч – десятки миллионов лет и более. В частности, периодичность главных фаз суперплюмов определена интервалом около 120 млн. лет, а периодичность плюмов второго порядка – примерно через 30 млн. лет [Добрецов, 2003]. Одна из первых попыток упорядочить представления о колебательных движениях Земли в целом с выделением планетарного, литосферного, корового и приповерхностного режимов относится только к началу текущего столетия [Чиков, 2003].

Корреляция глобальных геологических явлений показывает, что существует определенная связь длиннопериодных «колебаний», или периодических движений в геосферах, с общими причинами космического и внутриземного характера (периодичность геологической истории, периоды сейсмической и магматической активности, периодичность отрыва мантийных плюмов, изменения направления и скорости движения литосферных плит и т.п.). С периодическими движениями несомненную связь имеют короткопериодные геомеханические колебательно-волновые процессы. Представляется, что от планетарных периодических явлений в процессе анализа геодинамики литосферы целесообразно отличать относительно короткопериодные (от суточных до высокочастотных) геомеханические колебания и волновые механизмы переноса энергии и масс. Частично мониторинг короткопериодных колебаний Земли уже осуществляется сейсмологическими и гидрологическими службами, а также спутниковыми системами GPS и альтиметрии.

## Исходные понятия

В физическом представлении Земля является упругим деформируемым телом. В целом она (как и ее подсистемы) находится в состоянии *неустойчивого динамического равновесия* (равновесного напряженно-деформированного состояния), которое обеспечивается суммарной упругой деформацией элементов ее строения, взаимодействием блочно-зональных структур на их границах (сцепление), а также «переупаковкой» дискретных элементов геоструктуры под нагрузкой. Такое равновесие имеет *структурный* характер. При этом напряженно-деформированное состояние геосфер множественно неоднородно в связи с тем, что напряжение в каждом конкретном месте зависит только от сил сцепления и упругой деформации среды в том же месте. Когда нагрузка превышает пределы эффективной прочности системы или ее части, равновесие перманентно нарушается, возникают остаточные деформации, а в предельных случаях – даже деструкция в объеме критического нагружения.

Динамически функционирующие системы литосферы находятся в состоянии *текущего (подвижного) равновесия* при условии, что часть параметров в рассматриваемом интервале времени остаются неизменными (концентрация вещества, температура или давление, химический состав и (или) объем тела при изменении температуры, стоячие волны в ограниченном жесткими границами объеме и пр.). При нарушении равновесия в литосфере возникают области неустойчивости, усиливающие нелинейный характер геодинамических систем. Здесь и далее собственно геодинамическими («современными») будем считать процессы с характерными временами, допускающими измерение имеющимися инструментальными средствами, а также события прошлого, которые могут быть оценены историческими свидетельствами «от мгновения образования единичной трещины до тысячелетия» [Гольдин, 2002]. Геодинамические события, отделяемые от современности более чем тысячелетиями и не имеющие связи со шкалой общественной истории, следует относить к палеогеодинамическим.

Качественные различия структурного и динамического равновесия литосферы определяются характером и распределениями энергетического воздействия и свойств среды, что в

свою очередь создает основу выделения геодинамических режимов (геотермических, геомеханических, флюидных и т.п.). *Колебательные режимы* – это состояние геологических сред с характерным проявлением колебательных и волновых механизмов. Они являются частным случаем системы геомеханических режимов, а их основными свойствами являются: множество и разнообразие источников возбуждения, суперпозиция (независимость) и интенсивность колебаний при взаимообусловленности колебательных механизмов, дифракция и интерференция волн, их рассеяние, отражение и поглощение, а также наличие триггерных, резонансных и автоволновых явлений.

Практически все функционирующие системы (подсистемы) планеты относятся к категории *нелинейных колебательных*. Их важнейшим свойством является то, что собственные колебания образуются не только в результате внешнего воздействия (вынужденные колебания); они возникают и устойчиво поддерживаются в самой системе (эффект автоколебаний). Другим характерным свойством этих систем является их открытость, т.е. они обмениваются с окружающей средой энергией и веществом притом, что в них самих энергетические процессы протекают в виде химических реакций и массопереноса на более высоком иерархическом уровне. Открытость геологических систем предопределяет возможность нерегулярных и изменчивых внешних воздействий, усиливающих нелинейность. Вместе с тем, в открытых геосистемах возможны стационарные состояния в фиксируемом интервале времени – в этом проявляется сходство стационарных и равновесных систем; динамические системы могут проходить через несколько стационарных состояний, причем, в каждом из них система стремится сохранить его [Летников, 1992]. И, наконец, короткопериодные геологические колебательные системы функционируют на фоне длительности геологического времени, которое как бы суммирует эффекты дискретных периодов колебаний и «направленных в среднем» движений по принципу «капля камень точит».

При описании колебательных режимов литосферы автор использует системы понятий и терминов механики и физики колебаний и волн [Вибрации..., 1978-1981; Горелик, 1950, и др.]. К *колебаниям* относятся разнообразные движения материальных частиц (тел, поверхностей, объемов), обладающих той или иной степенью по-

вторяемости; эта повторяемость может быть как гармонической (изменяющейся по определенным законам), так и не строго регулярной. Основные характеристики колебаний: частота, амплитуда, фаза и форма. В случае периодичности событий чаще одного в секунду колебательные движения обычно называют *вибрацией*. В механике различают колебания: *собственные* (периодические движение тела, выведенного из равновесия разовым усилием извне и затухающие от трения), *вынужденные* (вызванные колебаниями среды) и *автоколебания* (незатухающие периодические движения, систематически возбуждаемые и поддерживаемые внешней энергией, в т.ч. не колебательными силами, при отсутствии внешнего переменного воздействия).

Распространение колебаний производится *волнами*; их характеристиками являются длина, форма и частота, а основными свойствами – энергия, импульс и скорость распространения в объеме [Пирс, 1976]. Волны распространяются в объеме, но обычно выделяются и регистрируются продольные (колебания в вертикальной плоскости) и поперечные (колебания в горизонтальной плоскости). Падая на шероховатые поверхности волны могут менять форму или рассеиваться при отражении. Явление усиления или ослабления результирующей волны от сложения фаз нескольких волн называется *интерференцией*. Подобно любому движущемуся телу волны передают энергию от одной точки к другой (мощность), отражаясь или поглощаясь поверхностью тел волны давят на них (импульс), имеют конечную скорость (от 300000 км/сек для электромагнитных волн от Солнца до 344 м/сек для звуковых волн, распространяемых в воздухе). При переходе из одной среды в другую энергия волн преобразуется. Например, электромагнитные волны от Солнца (мощность около 1 квт/м<sup>2</sup>) попадая в солнечные батареи трансформируются в электричество, а в растениях преобразуется в энергию биохимических реакций (фотосинтез).

Термин *бегущая волна* обозначает любое меняющееся во времени пространственное чередование минимумов и максимумов физических величин (чередование фаз – движущихся «горбов» и «впадин» на колеблющейся поверхности). В геологических процессах особое значение имеют бегущие *ударные волны*, которые возникают при внезапном (взрывном) высвобождении, когда жесткость среды увеличивает-

ся при увеличении напряжения, или импульсном вводе энергии извне. При движении эта волна создает поток вещества, который следует за ней; ее движение в невозмущенной среде сопровождается многократным увеличением давления, температуры и плотности этой среды. Характерное свойство ударной волны – быстрое затухание (при заданном  $d$  заряда в воздухе через  $n100 \times d$ , в воде  $\sim 2d$ , в твердой среде  $< 1d$ ) [Гласс, 1977]. Но при этом вынужденные колебания (бегущие волны деформации) охватывают значительно большие объемы среды пропорционально энергии ударной волны (см. далее).

Характерным примером регулярных колебательных движений является *стоячая волна* – колебание, не меняющее положение, частоту и фазу при изменении амплитуды; иными словами, в стоячих волнах происходит преобразование кинетической энергии в потенциальную и обратно, но эти волны способны возбуждать вынужденные колебания и бегущие волны. Максимальным амплитудам стоячих волн соответствует понятие «пучности», а минимальным – понятие «узлы».

### Колебательные эффекты в механике

Колебательные явления в физических системах относятся к области механики колебаний, где принято различать движения быстрые (колебательные, вибрационные) и медленные (изменение положения самой системы) и, соответственно, быстрые и медленные «силы». Для развития представлений о вибрационных эффектах в геологических системах очень большое значение имеют как вибромеханические (силовые, кинетические, конструктивные, волновые и пр.), так и виброреологические эффекты кажущегося изменения условий деформации и течения вещества (исчезающего после снятия вибрации).

К основным следствиям действия колебательных режимов на нелинейные механические системы относятся [Блехман, 1988, 2003; Вибрации..., 1978-1981]:

а) *эффекты направленного перемещения* твердых тел и блочных массивов, образование потоков и сепарационных явлений в сыпучих средах и жидкостях и т.п. (направленный массоперенос);

б) *эффекты виброреологического типа* (преобразование сухого трения в вязкое, виброползучесть, подъем более плотных тел выше

легких; смена ламинарного течения в жидкости турбулентным, «виброкипящие» мелкоблочные среды и пр.);

в) *возникновение интенсивного механического и механохимического взаимодействия* между частицами и объемами многокомпонентных систем (механохимическая активация процессов преобразования химических и минеральных систем);

г) *изменение общего характера поведения колебательных систем* (смена положений равновесия, появление новых видов движения и т.п.);

д) *эффекты изменения резонансной частоты* (раскачка колебательной системы под влиянием периодических толчков с нарастанием (или уменьшением) амплитуды колебаний и ростом неустойчивости системы) и *автоколебаний* (незатухающие колебания в системе, поддерживаемые поступлением энергии в количествах, равных ее рассеянию).

Эффекты направленного вибрационного массопереноса и явлений виброреологического характера обусловлены наличием в материальных системах асимметрий: анизотропии коэффициента трения, траекторий вибрации точек поверхности, конструктивных неоднородностей блочных сред, а также начальным скольжением малым приложением «боковой» силы и пр. Физические механизмы латерального вибрационного перемещения можно представить моделью поведения полусферы с массой  $m$  на колеблющейся поверхности с трением (рис. 1):

1) Без вибрации смещение полусферы возможно при боковом усилии  $F > \mu \times mg$ ; при меньшем значении  $F$  тело остается неподвижным (1а).

2) Вибрирующая полусфера не смещается по поверхности при отсутствии анизотропии коэффициента трения ( $\mu_1 = \mu_2$ ); она совершает симметричные колебания относительно некоторого среднего положения (1б).

3) Смещения полусферы при вибрации осуществляются в случаях: анизотропии коэффициента трения (1с), силовой асимметрии (1д), наклона поверхности (1е), наличия структурных неоднородностей (1ф), а также в случаях асимметрий кинематического, градиентного и других типов.

Перечисленные эффекты в ряде случаев как бы нарушают ряд законов физического мира. Но эти кажущиеся противоречия снимаются в момент прекращения действия вибрации.

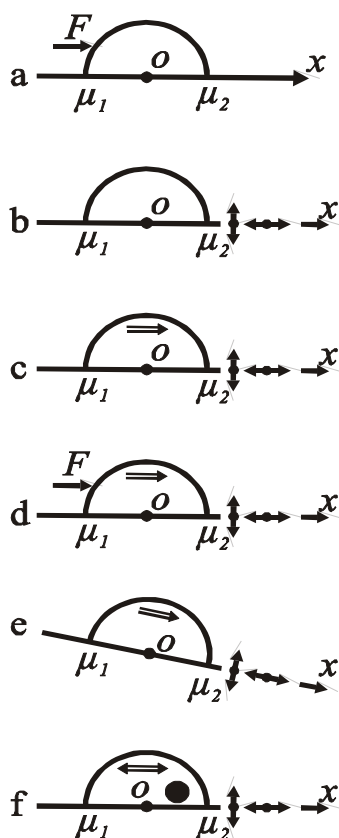


Рис. 1. Вибромеханические и виброреологические эффекты смещения в экспериментах (на основе [Блехман, 1988]).

$o$  – координатный центр полусферы на оси  $x$ ; двойная стрелка – направление смещения полусферы при вибрации; черный шар в полусфере – наличие структурной неоднородности;  $\mu$  – коэффициент сухого трения (общее условие:  $\mu_1 = \mu_2$ , за исключением 1с, где  $\mu_1 > \mu_2$ ).

увлажненный песок по принципу стоячей волны на вибростенде конструкции П.Е. Котляра обнаружили «не соответствующие» правилу равенства действия и противодействия виброреологические и вибромеханические эффекты: «виброкипящие» ситуации, эффекты растяжения (утонение равномерно рассредоточенной среды и раздвигание блочных доменов), сжатия (утолщение, надвигание по периферии «раздвигов»), образование изометричных пучностей), образование структур течения, сепарации и разрывов типа сдвига [Kotlyar et al., 1996].

Ряд эффектов вибромеханики получили собственные названия в связи с общим характером проявления в разных условиях; аналоги этих эффектов можно усмотреть и в геологических ситуациях (см. далее). Примерами служат эффекты «виброкипажа» и «вибронасоса». В первом случае за счет рассредоточенных

В.Н. Челомей [1983] показал в экспериментах ряд вибрационных эффектов, которые «противоречили» закону гравитации: движение незакрепленного металлического кольца вверх по вибрирующему стержню, устойчивое положение «перевернутого» маятника с пульсирующей точкой подвеса и др. В частности, к таким парадоксам механики, вызываемым вибрацией, В.Н. Челомей отнес эффекты всплывания плотных шаров в жидкости и распределение их в вертикально вибрирующем цилиндре выше слоев менее плотной жидкости и даже каверн с водо-воздушной смесью (рис. 2).

Широко известны эффекты воздействия вибрации на мелкоблочные сыпучие среды и массопереноса за счет увеличения текучести (снижения межзернового сцепления). В частности, наши экспериментальные воздействия на

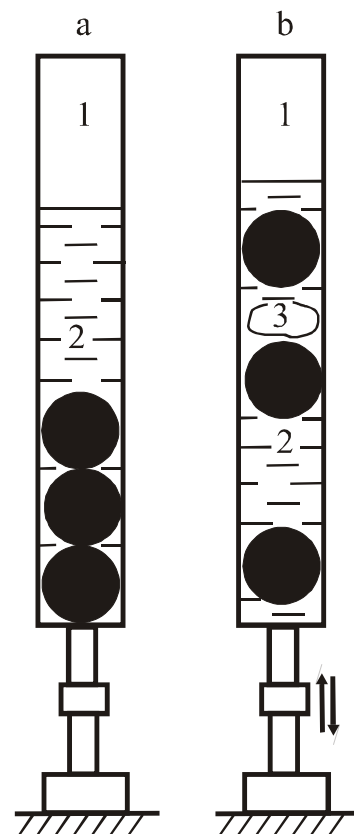


Рис. 2. Поведение тяжелых шаров (черное) в цилиндре с вибрирующей жидкостью [Челомей, 1983]; (схематизировано).

а) вибратор выключен; воздух (1), жидкость (2) и шары распределены в соответствии с плотностью; б) вибратор включен (колебания вдоль оси цилиндра); вынужденное распределение шаров, в т.ч. выше водо-воздушной каверны (3).

периодических воздействий в системе возникает колебательное «направленное в среднем» перемещение частиц (тел); энергия для поддержания такого перемещения может поступать как извне, так и стимулироваться внутренним (внутрисистемным) источником (поперечные колебания типа бегущей волны обеспечивают направленное движение, автоволновые колебания передают энергию в пограничный слой и т.п.). В случае эффекта «вибронасоса» колебание твердого или упругого тела в жидкости или газе вызывает «направленное в среднем» течение среды вблизи этого тела (колебание типа бегущей волны – движение в направлении распространения волны; вертикальные колебания типа поршня – движение вдоль оси и др.); вполне вероятно, что этот эффект сопровождает приливные движения (см. далее).

Анализ колебательных эффектов механики с позиции землеведения позволяет усмотреть множество природных аналогий (пусть еще отдаленных), а также необходимость и целесообразность использования принципов механики колебательных систем при анализе литосферных ситуаций. В геологических процессах существенное значение имеют такие колебательные эффекты как: а) ускорение процессов крипа при колебаниях даже относительно небольшой амплитуды (*виброползучесть*); б) существенное ускорение процесса снижения напряжения в геосистемах (*виброрелаксация*); в) снижение среднего уровня нагрузки для разрушения породных масс (*виброусталость*); г) увеличение эффективной вязкости при переходе от ламинарного к турбулентному режимам течения (*вибротекучесть*) и другие явления.

В основе представлений теоретической физики о колебаниях и волнах лежат линейные физические системы, которые с достаточной (для практического использования) степенью приближения описываются дифференциальными уравнениями на основе гармонических волн. Аналитические модели колебательного деформирования сыпучих сред, основанные на дилатансии и внутреннем трении, разработал А.Ф. Ревуженко [1974, 1980]. Он показал, что такие среды представляют собой двухфазные смеси, включающие фазу твердых частиц и незаполненное поровое пространство. При деформировании такой смеси происходит переупаковка частиц с сокращением порового пространства, микровращением частиц и их упорядоченным распределением. Р.Ф. Ганиев и Л.Е. Украинс-

кий [1975] в аналитической форме рассмотрели задачи движения частиц в потоке под действием постоянных и начальных (действие на ограниченных отрезках траектории) вибраций, движения твердых частиц в сжимаемой сплошной среде, в стоячей и бегущей волне и др. Показано, что благодаря действию начальных вибраций в определенные моменты времени и в определенных сечениях потока вокруг некоторых частиц группируются другие частицы потока (сепарация и сегрегация); другим эффектом является дробление частиц, если внешние силы оказываются больше поверхностных сил разрушаемой частицы и пр.

В силу множественности причин, обуславливающих природные колебательные процессы, последние описываются более сложными системами уравнений, которые относятся к категории нелинейных. Как правило, для природных нелинейных систем удается достигнуть удовлетворительных решений только в «краевых» (теоремных) случаях.

### Энергия и механизмы колебаний литосферы

Попытки оценить энергию геологических процессов известны давно [Горшков, 1984; Gubbins, 1977; и др.]. В 1969 г. в Москве состоялся симпозиум по проблеме энергетики геологических процессов. Большое внимание было уделено ротационной, термической и радиоактивной геоэнергетике; были даны предварительные оценки количества. Но кроме вращения Земли об энергии колебательных движений речи не было. Тридцать пять лет спустя появились численные оценки энергии сильных возмущений, в том числе «ударного» характера. Согласно [Адушкин, Зецер, 1994], основными энергетическими характеристиками Земли являются количества энергии гравитации ( $2,5 \times 10^{32}$  Дж), ротации планеты ( $2,1 \times 10^{29}$  Дж) и гравитационной конвекции в недрах ( $5 \times 10^{28}$  Дж). К числу прочих высокоэнергетических «сильных возмущений в геосферах», влияющих на режим нарушения равновесия и оказывающих «ударные» воздействия на иерархию геологических систем, относятся (см. там же; оценка энергии в Дж): землетрясения с магнитудой более 4 (до  $3,6 \times 10^{17}$ ), вулканические извержения ( $10^{15}$ - $10^{17}$ ), обрушения склонов, лавины на континентах ( $10^6$ - $10^{10}$ ), подводные оползни и турбидитные потоки (до  $10^{17}$ - $10^{19}$ ), смерчи, тор-

Сейсмическая энергия землетрясений [Geer, Shah, 1984]

Магнитуда по шкале Рихтера	Сейсмическая энергия, $10^{20}$ эрг	Энергия, кратная событию с $M = 4$	Магнитуда по шкале Рихтера	Сейсмическая энергия, $10^{20}$ эрг	Энергия, кратная событию с $M = 4$
4,0	0,0013	1	7,0	110,00	80 500
5,0	0,063	48	8,0	3700,00	2 800 000
6,0	2,70	2100			

надо, ураганы и т.п. ( $10^7$ - $10^{17}$ ), ядерные и горно-эксплуатационные взрывы (до  $2,4 \times 10^{17}$ ), обрушения при эксплуатации месторождений полезных ископаемых (до  $10^6$ ) и др. По-видимому, даже небольшая часть суммарной энергии планеты, расходуемая на возбуждение колебаний и волновую трансляцию, способна в благоприятных условиях произвести значительную работу по структурированию и массопереносу в земной коре. Однако, энергетические источники разной природы по разному проявляются в литосферных процессах, имея преимущественные области энерговыделения.

Уже единичные события геодинамики, фиксируемые землетрясениями, указывают на высокую энергоемкость колебательных процессов в литосфере. Согласно Г.П. Горшкову [1984], общее число сейсмических событий в год с магнитудой  $< 2 - \geq 8$  достигает  $10^6$ . Из таблицы 1 видно, что с ростом магнитуды на одно деление шкалы Рихтера выделяемая сейсмическая энергия, составляющая лишь незначительную часть (менее 10 %) общей энергии структурно-вещественных преобразований в очаге, возрастает соответственно в 35-48 раз. Энергия землетрясения с  $M$  около 8,6 достигает  $3-5 \times 10^{24}$  эрг. Рассматривая «площадь афтершоков» как проекцию гипоцентральной области на поверхность, Т. Цубои определил максимальные размеры очага в сечении порядком  $100 \text{ км}^2$ . Иными словами, сильное землетрясение соответствует энергетическому воздействию и стресс-метаморфизму пород в очаге на расстояниях в десятки километров [Ризниченко, 1985; Стейси, 1977]. Анализ сейсмической активности (число землетрясений определенной мощности, возникающих за единицу времени) – наиболее распространенный способ оценки региональной геодинамической активности. В работе [Котляр, Ким, 1994] для периода 1897-1989 гг. вычислена ежегодная «интегральная сейсмическая энергия» порядка  $1,5-25,0 \times 10^{24}$  эрг; по-

видимому, это одна из немногих попыток детальной оценки годовой энергетики сейсмичности литосферы в целом.

В верхней литосфере хрупко-пластическая деформация сейсмогенного типа обычно сопровождается разномасштабными эффектами типа удара или срыва, а также «доударными» (форшоковыми) и мощными «послеударными» (афтершоковыми) толчками. Например, в период продолжительного последствия Чилийского землетрясения (1960 г.) подземные толчки, колебания почвы, обвалы породных масс и оползни охватили территорию, превышающую площадь Великобритании, а в результате Гималайского землетрясения 15 августа 1950 г. (сила определяется сравнением с взрывом 100 тыс. атомных бомб типа «хиросимского мальчика») переместилось около 2 млрд. тонн горной породы (около  $850 \text{ тыс. м}^3$ ). В соответствии с указанными эффектами «направленного в среднем» массопереноса в земной коре происходят необратимые преобразования.

Моделью возбуждения сейсмических волн являются взрывы [Курленя и др., 1987; Мосинец, Шемякин, 1974; Bukhnam, 1969]. Их исследование позволяет сформулировать представления о природе возбуждения сейсмических колебаний и волн: 1) это цепь последовательно вводимых в действие источников колебаний, генерирующих волны различного типа; 2) волны, генерируемые одним источником, характеризуются постоянным периодом колебаний; 3) волны, возникающие на разных стадиях взрывного процесса, распространяются независимо, но «накладываются» друг на друга по принципу суперпозиции колебаний. Специальные исследования последствия шахтных взрывов показали, что реакция породных масс в окрестностях взрыва также имеет колебательный характер, что породные блоки близ очаговых зон «приходят в движение, смещаясь синфазно и противофазно друг относительно друга» [Опарин и др., 2002, с. 49].

Показательным примером сейсмогенного «удара» и колебательного последствия являются подземные ядерные взрывы в Неваде в конце 1968 г. [Гохберг и др., 1988; Bucknam, 1969]. Сила взрывного удара здесь достигала 1 Мт ( $10^9$  кг ВВ); на поверхности вокруг проекции точки взрыва ( $r = 450$  м) наблюдалась интенсивная множественная механическая деформация породных масс (можно предполагать какие преобразования вещества произошли в «очаговой зоне!»); смещения по ранее известным разрывам были установлены в радиусе более 5,5 км; колебательное последствие только афтершокового характера (10 тыс. толчков с  $M = 1,3-4,2$ ) продолжалось несколько месяцев (!). К этому следует добавить то, что в кратере от ядерного взрыва начальное ударное давление достигает 1000 Мбар, а температура за фронтом ударной волны – порядка  $10 \times 10^6$  градусов [Кноулз, Броуд, 1981]. При таких параметрах физические процессы и химические реакции протекают за наносекунды ( $10^{-9}$ с).

Относительно высокая скорость процесса перераспределения химических элементов и минеральных зерен в условиях ударной волны и последующей высокочастотной вибрации подтверждается экспериментами по схеме: направленный взрыв – перенос энергии ударной волной – колебательное последствие – структурирование минеральной среды. В эксперименте с мелкоблочной квазигомогенной сыпучей средой процесс ее компактирования (литификации), эффекты перераспределения химических элементов, минеральных зерен и сепарационной «расслоенности», а также образование структур течения и остеклования минеральной массы в осевой зоне «уложился» в момент удара (наносекунды) и секунды послеударного колебательного последствия [Чиков, 1992].

О высокой скорости «ударно-волнового» преобразования минеральных сред говорят и прессовые эксперименты с кварцитом, гранитом, базальтом, энстатитом и другими породами. Они проводились на установке Г.Д. Ушакова по схеме: напряженное состояние всестороннего обжатия (29 кбар) – стрессовое воздействие (до 18 кбар) – «ударный срыв» – формирование зоны кардинального структурно-вещественного перерождения исходного минерального субстрата. Все преобразования происходят в условиях стесненного сдвига и колебательного последствия в течение секунд эксперимента [Чиков, 1992].

## Колебательные режимы литосферы

Вращающаяся Земля представляет собой автоколебательную систему; ее собственные колебания порождают «всеземную» систему стоячих волн, каждая из которых представляет собой генератор и своеобразный камертон, готовый к резонансу. Появление дополнительных колебательных систем в недрах литосферы сопровождается интерференцией и, при совпадении этих колебаний с одной из стоячих волн, явлениями резонанса. «Система общеземных стоячих волн и формируемых на их основе гармоник, а также резонанс возбуждаемых ими волн и региональных волн создают упорядоченные интерференционные решетки, на базе которых возникают ... пликативные и дизъюнктивные структуры» [Богацкий, 1986, с. 35].

Собственные колебания Земли относятся к категории колебаний планетарного масштаба со значением периодов от десятка минут до часов и более. Они делятся на два больших класса [Собственные..., 1964; Жарков, 1978]: *сфероидальные* (вектор смещения материальных «точек» имеет составляющие как по радиусу, так и по направлению перемещения) и *крутильные* или *тороидальные* (не связаны с изменением объема и формы Земли; материальные частицы перемещаются только по сферическим поверхностям). Периодичность собственных колебаний меняется в широких пределах от первых минут до приближения к часу (43,94-53,83 мин), причем, самые медленные колебания захватывают весь объем Земли [Браун, Массет, 1984]. С собственными колебаниями Земли имеет связь характер распределения в пространстве и времени разнообразных природных явлений от геодинамики мантии, периодичности сейсмической активности литосферы, коллизионных поясов коры до морфоструктур рельефа и колебаний климата на поверхности. Разновидность собственных колебаний типа «дрожания» Земли как упругого тела вызывают в литосфере напряжения «чистого сдвига» и всестороннего сжатия (или растяжения). Такие колебания возбуждаются сильными сейсмическими событиями и могут продолжаться длительное время. Впервые явление было обнаружено Г. Беньофом при анализе сейсмограмм Камчатского землетрясения 1952 г.; в последующем при анализе сейсмограмм катастрофического Чилийского землетрясения 1960 г. был обнару-



жен эффект расщепления частот таких колебаний [Кузнецов, 1997].

Лунные приливы – наиболее заметное следствие гравитационного взаимодействия Земли и ее спутника [Проблемы..., 1963; Мельхиор, 1968, и др.]. Это практически единственное глобальное колебательное явление, для которого можно определить параметры с удовлетворительной точностью; величина солнечных приливов примерно в три раза меньше. Под влиянием гравитационных сил Луны два раза в сутки, а точнее через 12 часов 25 минут уровень Океана достигает своего максимума, а через такой же промежуток – минимума. Средняя амплитуда лунных приливов водной поверхности около 1 м, а поверхности твердой Земли – около 10 см (максимально до 35 см). Амплитуда приливных колебаний максимальной величины достигает на широтах около 50° (на мелководьях Охотского, Берингова и других арктических морей высота прилива достигает 10-15 м и более). Скорость бегущих волн лунных приливов в экваториальных широтах превышает 900 м/с, а на средних – достигает 290 м/с. Регулярные лунные приливы в связи с большой длиной волн колебания нами не ощущаются, но можно предполагать, что за миллионы лет такие колебания формируют системы трещин «виброусталости» (региональные системы глыбовых кливажных трещин в крупных породных массивах коры).

Литосферные колебательные режимы являются основным следствием коллизионных, спрединговых, сдвиговых и т.п. взаимодействий литосферных плит и разномасштабной объемной механической деструкции литосферы; систематическое выражение эти режимы имеют в сейсмогенных явлениях. В концентрированном виде колебательные режимы литосферы представлены в глобальных поясах сейсмичности активных окраин Океана (более 75 % выделяемой сейсмической энергии Земли) и гребневых зон срединных океанических хребтов (около 5 %).

С.В. Гольдин [2002] обратил внимание на то, что энергетические причины разрушения (деструкции) литосферы и связанные с этим явления имеют глобальный характер, являясь по существу процессом приспособления объемов геологического вещества к длительным силовым воздействиям планетарного масштаба; в конкретных проявлениях деструкция имеет многофакторный характер в связи с разнообра-

зием условий и форм накопления и релаксации энергии. Ряд положений этой работы, имеющих отношение к «быстрой деструкции», имеют важное значение для понимания природы колебательных режимов литосферы и эффектов принципа колебательного последействия:

а) глобальный характер деструкции литосферы имеет обусловленность «постоянно действующим астрономическим фактором, включающим чандлеровы колебания оси вращения Земли, кориолисовы ускорения и приливные волны в твердой оболочке Земли. ... По величине выделяемой энергии астрономический фактор сопоставим с выделяющейся при землетрясениях суммарной энергией» (с. 10);

б) многоуровневость процесса деструкции литосферы (можно ожидать, что колебательное последействие разрушения также проявляется на всех иерархических и масштабных уровнях геологического пространства – Б.Ч.);

в) соответствие поясов и областей сейсмической активности положению сейсмогенных зон деструкции (и колебательного последействия – Б.Ч.) литосферы; механизмы разрушения наиболее интенсивно проявляются в условиях растяжения (см. далее);

г) стационарность процесса разрушения литосферы на длительных интервалах времени при нестационарности характера напряженно-деформированного состояния сейсмоактивных зон и сейсмических событий с концентрацией энергии в относительно короткие интервалы геологического времени (соответственно, в эти периоды вибрационные силы и интенсивность колебательного последействия в коре активизируются – Б.Ч.).

Идея проникающей «кусковатости» коры и ее частей [Садовский, 1979] разрабатывалась с учетом волнового характера нагружения сред в напряженно-деформированном состоянии, колебательных механизмов уплотнения и переупаковки блоков, изменения конфигурации блочных агрегатов и т.п. Проявление деформации блочной среды возможно лишь при условии накопления в коре энергии, достаточной, чтобы дополнительный импульс мог привести к потере ее динамической устойчивости. Особо следует подчеркнуть: «даже малая амплитуда внешнего воздействия (например, микросейсм) может вызвать скачок деформации такого же порядка величин, что и вызываемые большой «пиковой» амплитудой» [Садовский, Писаренко, 1991, с. 89].

Основное количество землетрясений имеет коровую природу с глубиной очагов до 30 км [Новый каталог..., 1977], хотя распространение колебаний корой не ограничивается. К коровым колебательным режимам относятся колебательные активизации сейсмоактивных зон земной коры в характерных геодинамических обстановках формирования тектонических зон вулканизма, деформационно-метаморфических поясов, коровых рифтов и т.п. Распространяясь в объеме коры волны проникают глубже ее основания, а по латерали – на многие десятки и даже сотни км. Очаговые зоны с  $M = 4$  имеют объем порядка  $4-10 \text{ км}^3$  (с  $M > 8$  до первых сотен). Причиной геоструктурных колебаний являются механизмы импульсного массопереноса и деструкции коры в соответствующих масштабах. При возбуждении сейсмических волн в полостях (телах) сложной конфигурации возникают резонансные частоты, отвечающие за собственные колебания в различных направлениях. Они сопровождаются резонансными явлениями, имеющими локальный характер в зависимости от формы и относительных размеров полости [Новые геотехнологии..., 2002].

Для колебательных процессов геоструктурного плана характерна, прежде всего, нестационарность, которая обусловлена неравномерностью выделения энергии во времени и пространстве, а также нестабильностью реакции среды на нагружение; иногда оказывает влияние смена общего характера геодинамического режима [Дядьков и др., 2000]. Так прерывистость процессов деструкции в сейсмоактивных зонах типа Байкальского рифта выражается тем, что «...суммарная энергия землетрясений на интервалах времени, связанных с длительностью инструментальных наблюдений меняется значительно (до двух порядков) и имеет явно нестационарный характер» [Гольдин, 2002, с. 15]. Согласно справочников, в течение года на Байкале фиксируется более 2000 землетрясений (5-6 событий в сутки), в т.ч. сильные события регистрируются с периодичностью: 7 баллов через 1-2 года, 8 – через 5, 9 – через 15 и 10 – через 50 лет. Аналогичный режим активной сейсмичности подтверждается частотой мелкофокусных землетрясений в рифтовых долинах срединно-океанических хребтов (донные сейсмографы фиксируют до 50-60 «ударов» небольшой силы в сутки). Следовательно, для структур рифтогенного типа режим периодических «ударов» и колебательных последей-

ствий – состояние квазистационарное.

Мощным возбудителем нарушения регионального динамического равновесия и колебательных режимов в земной коре являются извержения вулканов. Природа таких явлений обусловлена тем, что давление газов в магме, движущейся по подводящему каналу, значительно превышает литостатическое давление среды и предельную прочность лавовой пробки в области вулканического конуса. Подобные извержения, например, на Камчатке происходят с периодичностью около 10 лет. Как показывают результаты исследования эксплозивного извержения вулкана Шивелуч в апреле 1993 г. [Федотов и др., 1995], событию предшествовал этап «сейсмической подготовки» (январь-начало апреля), когда в районе купола ежедневно происходило 20-30 толчков. Резкое усиление активности наблюдалось в период 5-22 апреля, когда произошла серия (рой) мощных «форшоковых» землетрясений параллельно с увеличением объема купола на  $56 \times 10^6 \text{ м}^3$ . Основной взрыв произошел во второй половине дня 22 апреля (с увеличением объема купола на  $34 \times 10^6 \text{ м}^3$ ), после чего сейсмическая активность «роя» резко сократилась, но эффекты колебательного последействия продолжались до сентября. По-видимому, аналогичные (но разной «силы») колебательные режимы возникают при извержениях во всех вулканических зонах и оказывают воздействие как на характер извержения и условия остывания лав, так и на режим кристаллизации магмы периферических очагов.

Приповерхностные (микросейсмические) колебания с диапазоном частот от долей до сотен Гц – неотъемлемое свойство верхней части земной коры. Низкочастотные моды микросейсм возникают после землетрясений и океанических циклонов, от цунами или сейшей в замкнутых водоемах, от штормовых волн и падения метеоритов. Такие колебания также могут быть вызваны ветром, волнением на озерах и течением рек, водопадами, снежными лавинами, сходом ледников и т.п. Регулярные малоамплитудные микросейсмические вибрационного характера часто обусловлены техногенными причинами (движение транспорта, деятельность промышленных предприятий с режимом импульсного механического нагружения, взрывная «отпалка» и обрушения руды на горно-эксплуатационных комплексах и пр.). Например, вибрация после запуска ракеты фон Брауна «Сатурн-3», доставившей

первых астронавтов на Луну, фиксировалась в радиусе до 1500 км в течение многих часов. А образование склоновых обрушений, наряду с природными причинами (см. выше), может стимулироваться также техногенными микросейсмами, что видно на примере оползания курортных построек Сочинского побережья над полотном железной дороги.

Крупные ( $d$  более 1 км) космические тела при падении на Землю генерируют мощные ударные волны за счет высвобождения огромного количества накопленной кинетической энергии (за счет массы и скорости движения). Возникают ударные волны как в твердой Земле, так и в воздухе; в колебательный процесс вовлекаются атмосфера и кора, а в отдельных случаях и мантия. Диаметр наиболее крупных астероидов достигает 5-10 км и более. Так, ударный кратер Чикслуб, образовавшийся около 65 млн. лет назад в Мексике, имеет ориентировочно от 180 до 280 км в диаметре; моделирование условий его образования позволяет предполагать, что соответствующие астероиды могут иметь размеры до 7-14 км в поперечнике и обладать энергией порядка  $10^7$ - $10^8$  Мт [Иванов, 1994]. Для сравнения: Аризонский кратер (США) имеет диаметр около 1300 м при максимальной глубине порядка 170 м, а Унгавский (Квебек, Канада) –  $d \approx 3500$  м,  $h_{\max} \approx 435$  м. Несмотря на относительную редкость подобных явлений (по разным оценкам одно событие за 1000-10000 лет), крупные метеориты, астероиды и кометы могут возбуждать интенсивные колебания и соответствующий массоперенос с образованием упорядоченных структур и минеральных превращений в геологических системах (по крайней мере, в окрестностях кратеров).

Характерной причиной возникновения ударных волн атмосферной природы являются грозы. Их на Земле бывает около  $16 \times 10^6$  в год (в среднем почти ежесекундно) при крайне неравномерном распределении. К числу особо опасных по своим последствиям относятся океанские ураганы (торнадо, циклоны) низких широт. Они обрушиваются на побережья материков со скоростью 60-100 м/сек и более, сметая на своем пути лесные заросли, жилые постройки и технические сооружения.

Особые сейсмогенные колебательные режимы коры образуют стоячие волны – это высокочастотные квазигармонические колебания, циклически преобразующие, но не пере-

мещающие энергию по латерали [Табулевич, 1986, 2002]. Они возникают как результат сложения встречных бегущих волн во внешних сферах Земли. А микросейсмы, вызванные стоячими волнами, распространяются на громадные расстояния и фиксируются практически всеми сейсмостанциями Мировой сети. Такие волны (зыбь) в акваториях внутриконтинентальных морей и озер инициируют инфразвуковые волны в атмосферу и вдоль водной поверхности; проекция области стоячих волн на дно моря представляет собой региональную зону возбуждения микросейсмических колебаний в земной коре. В тыловой части ураганов (тайфунов) в земной коре также возникают стоячие волны, которые генерируют периодические «удары» на дно моря.

#### **Проявления короткопериодных колебательных режимов в геологических процессах**

В механике разрушения и сейсмологии основное внимание обращается на момент, кинематику и морфологический тип механической деформации, а также на характер распространения деформационных волн. Другие следствия как бы остаются вне поля зрения. Но интерес геолога собственно механической деформацией не ограничивается; большое значение имеют химические, тепловые и другие виды деформаций-преобразований минеральной среды. Как и в механике, в природных геологических системах при накоплении эффектов регулярной (устойчивой по параметрам) вибрации образуются разномасштабные направленные перемещения геоблоков, а также разнообразные явления минеральных преобразований (метаморфизма) и упорядоченности геологической структуры.

В процессе геологических исследований в земной коре установлены разнообразные как седиментогенные (приповерхностные), так и более глубинные метаморфогенные и кристаллизационные регулярно упорядоченные системы. Эксперименты на основе прессовых, ударных или вибрационных технологий показывают, что значительная часть структурных и динамических систем высокой степени упорядоченности может быть прямо связана с природными периодическими движениями [Нестеренко, Чиков, 1992; Ревуженко, 1980, и др.]. Результаты моделирования сложных геологических

систем на колебательной основе обнаруживают ряд общих эффектов структурирования в условиях, традиционно обозначаемых режимами сжатия, растяжения и сдвига, воздействием температуры, флюидизации, а также гравитационной дифференциации и конвекции и т.п. В частности, эффекты регулярных колебаний могут привлекаться для объяснения таких явлений, как крупномасштабные сдвиги и перемещения геоблоков, механизмы протрудирования мантийного вещества в плотной среде коры, ускорение процессов гравитационных оползней и обрушений горных масс, а также склоновые камнепады, сходы лавин и ледников, солфлюкционные процессы и т.п.

Характерными примерами регулярно упорядоченных систем являются: джеспилиты (строго регулярное чередование «слоев» гематита и кварца в объемах рудных полей и месторождений); регулярно-слоистые кремнистые отложения активных окраин Океана (ритмика которых не соответствует направлению, скорости и объему поступающего в седиментационную систему кремнистого материала); геометрически правильная регулярность тонких флишей абиссали, свободной от сезонных колебаний скорости поступления материала «твёрдого стока»; образования разноцветной «слоистости» в придонных расколах Красноморских впадин; различные виды «расслоенности» и стяжений в вязких жидкостях магматических камер, как и столбчатые отдельности в лавовых потоках; региональные кливажные системы трещин в породных массивах и т.п. Даже этот краткий перечень примеров говорит о многообразии ситуаций, в которых короткопериодные движения могут играть существенную роль. Регулярные механизмы колебательного характера позволяют по новому объяснить природу подобных природных систем на основе принципов и установленных эффектов вибромеханики, виброгеологии и вибромеханохимии.

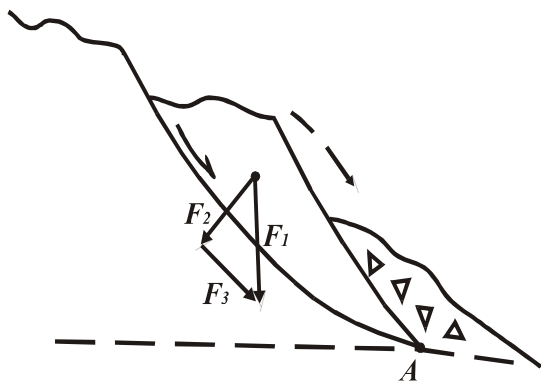
Особое внимание привлекают области высокоэнергетических событий сейсмофокальных зон «активных окраин», где формируются зоны субдукции и региональные зоны сдвига. Их развитие происходит в импульсном режиме по сценарию сочетания периодов длительного накопления энергии и относительно быстрой «разгрузки» в процессе множества сейсмических событий, разобщенных во времени, но концентрированных в пространстве.

Сейсмофокальные зоны представляют собой также мощные вибрационные геосистемы.

Важнейшим геологическим следствием шоковой деформации и колебательного последствия сейсмофокальных зон, наряду с деформацией коры, является преобразование минеральной (вещественной) основы среды. По сравнению с колебанием поверхности, структурно-вещественные и минеральные превращения в недрах требуют гораздо больших затрат энергии (ориентировочно более 90 %), но их следствия имеют не меньшее значение, чем механические деформации. Учитывая энергоёмкость процессов, не будет преувеличением считать, что именно в сейсмофокальных зонах совершается основная работа по деформации коры «активных окраин» и переупаковке блочных сред, а в очаговых зонах – также и минеральные преобразования породных масс в условиях «удар – колебательное последствие». Здесь образуются характерные структурно упорядоченные системы породного уровня, которые являются следствием кооперативности действия множества последовательных и взаимосвязанных механизмов локального и быстротекущего преобразования исходной среды.

В масштабах геологического времени развитие региональных сдвигов и надвигов соответствует импульсно-колебательным режимам с широким проявлением трансляционного скольжения за счет виброреологических эффектов кажущегося преобразования сухого трения в вязкое. Вибрация оказывает существенное влияние на скорость перемещения масс в зонах разломов [Ружич и др., 2000]. Формирование зоны сдвига сопровождается разнообразными эффектами объемной деформации коры, структурно-вещественными преобразованиями минеральных масс и формированием регулярно упорядоченных систем в условиях вибрации. Наиболее общими следствиями природных колебательных движений в породных средах региональных сдвигов являются эффекты вибромеханического фракционирования мелкоблочных тектонитов (структурная полосчатость распределения концентраций зерен по плотности, размерам, морфологии и пр.) и виброреологические эффекты образования упорядоченных структур регулярной полосчатости и течения в ламинарных и турбулентных формах и пр. [Ревуженко и др., 1974; Чиков, 1992, и др.].

Ряд численных моделей характеризует



геолого-структурные следствия колебательных режимов в земной коре. Так, причиной оползневого смещения породных масс на склонах являются: увеличение массы пород за счет обводнения; сейсмотолчки и технические взрывы; влияние прилива волн в прилежащем водоеме; работа тяжелого транспорта и промышленных предприятий, а также атмосферные явления. Формирование склоновых оползней (рис. 3) происходит в условиях действия сил гравитации ( $F_1$ ), сцепления ( $F_2$ ) и сдвига породной массы по поверхности смещения ( $F_3$ ). Вибромеханические условия смещения определяются соотношениями:  $F_2 > F_3$  – устойчивое состояние системы склона;  $F_2 < F_3$  – состояние прогрессирующего или вялотекущего оползня;  $F_2 = F_3$  – состояние неустойчивого равновесия. Точка А – опорная в склоновой системе; небольшое нарушение динамического режима в ее окрестностях (размыв, понижение устойчивости при увлажнении или техногенная выемка грунта) нарушает условие устойчивости и начинается процесс оползания; сила сцепления преобразуется в силу сухого трения. При наличии вибрации (волноприбойные механизмы, техногенная

Рис. 3. Схема взаимодействия сил при склоновом оползне.

вибрация и т.п.) неустойчивость системы наблюдается как в опорной точке, так и обозначается уменьшением сил сцепления (значение  $F_2$  стремится к 0); в процессе сдвига сухое трение преобразуется в вязкое. Следствием этого угроза начального срыва резко возрастает, а при наличии вялотекущего процесса также резко возрастает скорость оползня.

Принцип движения надвиговой пластины по поверхности с трением иллюстрирует (рис. 4). Особенностью природного процесса шарьирования является прерывистость перемещения сложно построенного покрова по неровной поверхности (движение прерывается периодами накопления энергии для продолжения деформации). Поэтому вместе с влиянием массы покрова и сил трения, энергетические затраты должны оцениваться с учетом начальных усилий, а также формы и площади надвига.

В схеме общее усилие, обеспечивающее движение пластины по поверхности, определяется как  $\Sigma F = F_m + F_\mu + F_1$ , где  $F_m$  – вес пластины,  $F_\mu$  – силы сухого трения, а  $F_1$  – начальное тяговое усилие (сцепление пластины с поверхностью); при наличии угла подъема суммарное усилие  $F$  увеличивается на величину  $\Delta F$  – дополнительное усилие на преодоление подъема.

Начальное тяговое (толкающее) усилие сдвига по ровной поверхности определяется выражением:  $F_1 = mg (\mu \times \cos\alpha + \sin\alpha)$ , где  $m$  – масса сдвигаемой пластины,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\mu$  – коэффициент трения,  $\alpha$  – угол наклона поверхности контакта пластины с поверхностью. В случае горизонтальной поверхности смещения ( $\alpha = 0$ )  $\cos\alpha = 1$ , а  $\sin\alpha = 0$ ; наклон поверхности смещения меняет значения тригонометрических функций. Подчеркнем, что величина  $F_1$  в случае сложной формы поверхности перемещения может превосходить зна-

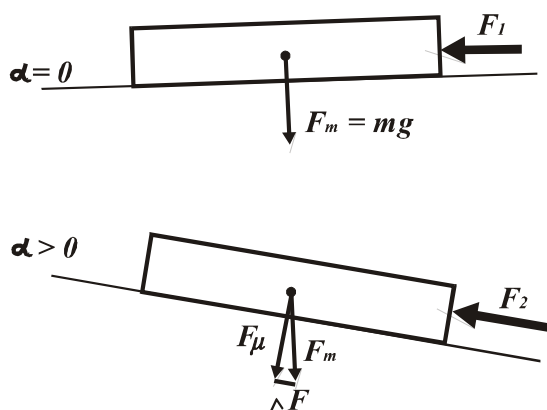


Рис. 4. Схема взаимодействия сил при движении шарьяжной пластины.

чения сил других причин. В процессе перемещения по относительно ровной поверхности значение коэффициента сухого трения уменьшается примерно вдвое, а в условиях вибрации  $\mu$  стремится к 0, уменьшая силы сцепления. Поэтому движение покрова в условиях вибрации происходит при минимизированном (для данной системы) ориентированном «боковым» давлении.

На качественном уровне механизм протрудирования мантийного материала в кору можно рассматривать в качестве эффекта «виброэкипажа» (см. выше) или эффекта «наоборот» относительно внедрения сваи в плотный грунт с применением вибрации. При этом должно соблюдаться одно условие – сила давления в направлении движения должна превышать силы сопротивления среды; выполнение условия в случае протрудирования с участием вибрации определяется тем, что давление в мантии всегда больше давления в коре, а колебание системы будет способствовать преобразованию сухого трения в вязкое, облегчая механизм внедрения мантийного материала в кору. Принцип «виброэкипажа» может также служить одним из объяснений заполнения кластической «дайки» снизу, миграции зыбучих песков и т.п. А эффект «вибронасоса» вполне реален во флюидных геосистемах от движения «рудных» растворов и миграции углеводородов до процессов дегазации мантии.

Широко известен эффект столбчатой отдельности в базальтах. Но аналогичная регулярная отдельность может возникнуть и в осадочных толщах при интенсивном ударно-колебательном воздействии. Подобное явление наблюдалось нами в районе шахтного поля горы Сокольной (Лениногорский район Рудного Алтая). Здесь в течение длительного времени на разных глубинах производились взрывные работы с мощностью зарядов 400-500 т в тротиловом эквиваленте; каждый взрыв сопровождался интенсивным послеударным колебательным последствием в обширной области рудного поля. На поверхности горы автор совместно с А.Н. Соловьевым и ст. геологом рудника В.П. Кармановым наблюдал разнообразные структурные следствия типа ветвящихся разрывов и грабенообразные провалы («рифты») глубиной до 3-7 м. В зоне провалов на поверхности горы Сокольной развита «полигональная» отдельность ( $d$  порядка 15-30 см) в алеволито-песчаниковой толще, столб-

чато проникающая на глубину не менее 5-7 м. Связь феномена «рифтогенеза» и столбчатой отдельности в осадочной толще с техногенным ударно-колебательным режимом очевидна.

В условиях регулярной вибрации структурные преобразования имеют не шоковый, а последовательно эволюционный характер. В породных средах (особенно в слабвязких) наиболее общими следствиями природных колебательных движений с частотами в преимущественной «полосе» 6-10 Гц являются эффекты вибромеханического перераспределения и сепарационной упорядоченности (как и **разупорядоченности** – см. далее) и виброреологические эффекты кажущегося преобразования сухого трения в вязкое (исчезающего после выхода из режима колебаний). Как уже было отмечено, на основе различий в плотности, размерности или морфологии минеральных зерен регулярные колебания обеспечивают упорядоченность их распределения и концентрации. К ним относятся: регулярная параллельная полосчатость, овоидные скорлуповатые структуры, квазислоистые концентрации тяжелых (в т.ч. рудных) зерен в динамокластитах зон смятия; различные виды линейности, «расслоенности» и «стяжений» в вязких жидкостях магматических камер; вторичные перераспределения частиц в донных осадках, а также придонных рассолах и т.п.

Особое значение режимы короткопериодных и высокочастотных колебаний имеют в механизмах концентрации рудных элементов; первую обстоятельную разработку этой идеи предложил В.В. Богацкий [1986]. Большое значение имеет то, что условия вибрации наряду с сепарированием ускоряют твердофазные химические реакции, в т.ч. реакции разложения металлосодержащих элементов, способствуют ускорению процессов диффузии и рафинирования минеральных зерен; в диспергитах активно проявляются эффекты механического и механохимического взаимодействия частиц мелкоблочных минеральных сред, когда твердофазная реакционная активность в них повышается на порядки  $10^4$ - $10^8$ , даже по сравнению с аналогичными реакциями в жидкой фазе [Ениколопан и др., 1986]. В условиях воздействия ударной волны и последующей высокочастотной вибрации высокая скорость процесса перераспределения химических элементов и минеральных зерен подтверждается экспериментами: при воздействии направ-

ленным взрывом на мелкоблочную квазигомогенную сыпучую среду процесс ее компактирования (литификации), эффекты перераспределения химических элементов, образование структур течения, механизмы сепарации и сегрегации рудных минералов «уложились» в момент удара (наносекунды) и секунды послеударного колебательного последствия [Нестеренко, Чиков, 1992; Чиков, 1992, 1998, 2003; Zhmodik, 2003, и др.]. Экспериментально установлено: а) вибрация сопровождается зонально-аккреционным сепарированием в зернистых минеральных средах; б) направленное взрывное воздействие на минеральные смеси сопровождается мгновенным зональным структурированием среды с сепарированием и концентрацией рудного вещества; в) разложение металлосодержащих соединений в условиях «удар – колебательное последствие» происходит со скоростью взрыва.

Следует подчеркнуть, что в связи с неопределенно-множественностью кооперативного действия «переупаковка» блочных сред в условиях колебательных режимов в одних случаях сопровождается упрочнением и структурной упорядоченностью, а в других – разупрочнением и перемешиванием (виброреологические тиксотропные эффекты). Причиной является то, что при незначительном отклонении от стационарности процесса (критическая интенсивность, аномалии круговых колебаний, конструктивная, силовая или кинетическая асимметрия и т.п.) возникают условия «перемешивания» и, как следствие, временный «хаос» перестройки прежней упорядоченности. Вероятно поэтому в природных структурных системах локализованные упорядоченности соседствуют с неупорядоченностями (распределение полнокристаллических и атацитовых структур в породном массиве интрузии, структуры «расслоенности» среди однородных структур кристаллизации, образование шпировых обособлений, «роев» или линз порфиробластов на фоне иных упорядоченностей, в том числе монотонно-кристаллических, и т.п.).

К негативным следствиям колебательных процессов относятся наблюдаемые природные и техногенные ситуации механического разрушения породных массивов, дорог и ограждений, а также промышленно-хозяйственных объектов при регулярном даже микросейсмическом воздействии (склоновые лави-

ны, обрушение берегов водохранилищ, оползни с разрушением зданий и сооружений и пр.

### Заключение

Явления колебательно-волнового характера – это свойство геодинамического состояния литосферы. В той или иной форме они участвуют в функционировании геологических систем практически всех иерархических уровней, оказывают влияние на экологические ситуации – мы живем в мире колебаний и волн. Но за исключением сейсмологии и ее разделов, в которых волновые процессы являются фундаментальной основой (в том числе для построения глобальных геотектонических моделей), и горного дела, где ударно-колебательные механизмы широко используются в теориях отработки и обогащения полезных ископаемых, большинство дисциплин наук о Земле лишь эпизодически привлекают колебательные движения в качестве структурообразующего фактора.

Колебательные режимы возникают как результат периодического или импульсного энергетического воздействия на геологическую среду и относятся к категории геомеханических режимов; наряду с режимами сжатия, растяжения или сдвига они создают особые условия структурирования геосфер. Силовые, кинетические, конструктивные, волновые и другие эффекты колебательно-массопереноса являются постоянно действующими факторами эволюции геодинамических систем литосферы.

В целом для колебательных режимов Земли характерны: *множество и разнообразие источников возбуждения; иерархичность и взаимообусловленность* колебательных механизмов; *интерференция* волновых процессов разнотипной природы и различных масштабов; *диссипативный характер* колебательных систем, способствующий как образованию упорядоченных структур в геосферах (за счет снижения кинетических барьеров и эффектов самоорганизации), так и хаотичности деструкции при наличии высокоградиентных асимметрий. Для сред с колебательными режимами характерны интференционные, триггерные, резонансные и автоколебательные явления.

Из анализа колебательных режимов, механических предпосылок и лабораторных

экспериментов следует, что «ударное» механическое воздействие на геологическую среду сопровождается колебаниями минеральных масс и соответствующими деформационными эффектами по модели очаговой зоны землетрясения. На этой основе формулируется эмпирическая зависимость, или **ударно-волновой принцип**: *в литосфере механическое воздействие типа удара (взрыва) всегда сопровождается более или менее длительным колебательным последствием, охватывающим значительные объемы среды пропорционально силе «ударного» воздействия; при этом значительная часть механической энергии преобразуется в тепло и энергию химических взаимодействий, и кооперативно они производят деформационно-метаморфическую «работу» в минеральных массах области влияния.*

В современных геодинамических системах выявлена определенная связь колебательных процессов твердой земли, гидросферы и атмосферы. В одних случаях колебательные механизмы дополняют энергетически более значимые явления, а в других – сами являются определяющими силами геологического процесса. Но колебательные движения разной степени частоты и интенсивности в природе обычно «работают» совместно с другими процессами, подчас более выразительными по наблюдаемым следствиям – такими как взаимодействия литосферных плит или региональная складчатость, процессы внедрения магмы в кору, явления минералообразования, гравитационные склоновые обрушения и т.п.

Колебательно-волновые явления в коре оказывают влияние на кинетику процессов механических деформаций, химических реакций, кристаллизации магм, осадконакопления, а также на формирование регулярно-упорядоченных систем литосферы. При определенной интенсивности и благоприятных предпосылках за счет вибромеханических и виброреологических эффектов колебательный режим способен изменить характер проявления основных физических законов в нелинейных геосистемах (равенства действия и противодействия; сохранения энергии и момента движения; гравитации и пр.); принципиально важное значение имеют эффекты механо-химической активации реакций синтеза и разложения при минералообразовании. Поэтому не вызывает сомнения необходимость учета ко-

лебательных механизмов при моделировании разнообразных геодинамических ситуаций, в т.ч. флюидодинамического и рудогенного характера. Это будет способствовать развитию объяснительных, предсказательных и технологических возможностей общей геодинамики.

Проблема влияния колебательных режимов на иерархическую систему геологических явлений сложна и неоднозначна, а полнота объяснения роли колебательных движений в текущих геологических процессах еще невелика. Но перспективы развития «вибрационного» направления геодинамики (**виброгеомеханики**) очевидны, в том числе в прикладном отношении. Выдающийся российский специалист в области теории колебаний академик Н.Д. Попалекси еще в середине прошлого столетия на Юбилейной сессии АН сказал: «...Среди процессов, как свободно протекающих в природе, так и используемых в технике, колебания, понимаемые в широком смысле этого слова, занимают во многих отношениях выдающееся, часто первенствующее место». И сейчас волновые эффекты в технических дисциплинах обеспечили буквально научно-технический прорыв; на их основе получены выдающиеся достижения технологического плана и оригинальные технические решения.

Разнообразие и взаимосвязь колебательно-волновых процессов в геосферах характеризуют сложность явления, но сложность еще не основание для того, чтобы проблему игнорировать. Уже известные опыты исследования эффектов колебательных движений Земли позволяют видеть перспективность этого направления при решении ряда задач, в т.ч. сейсмологии и мантийно-геодинамического моделирования, седиментологии и магматической геологии, геотектоники и структурной геологии, флюидодинамики и рудогенеза.

**Благодарности.** Автор выражает признательность докторам наук М.М. Буслову, Б.М. Глинскому, Ф.П. Леснову, А.Ф. Ревуженко, В.А. Старосельцеву и В.И. Юшину за конструктивное обсуждение проблемы и содержательные рекомендации на стадии подготовки обзора. Особая благодарность автора за консультации и помощь при подготовке статьи д. г-м. н. П.Е. Котляру и к. г-м. н. С.В. Зинovieву, с которыми автора связывает совместная работа в области технологий тектонического моделирования, в т.ч. вибрационного.



Список литературы

- Адушкин В.В., Зецер Ю.И.* Перераспределение энергии во внутренних и внешних геосферах при высокоэнергетических воздействиях (геофизика сильных возмущений) // Динамические процессы в геосферах: геофизика сильных возмущений. М.: Наука, 1994. 335 с.
- Блехман И.И.* Что может вибрация? М.: Наука, 1988. 208 с.
- Блехман И.И.* Вибрация «изменяет законы механики» // Природа. 2003. № 11. С. 42-53.
- Богацкий В.В.* Механизм формирования структур рудных полей. М.: Недра, 1986. 86 с.
- Браун Д., Массет А.* Недоступная Земля. М.: Мир, 1984. 261 с.
- Вибрации в технике: Справочник в 6 томах. М.: Машиностроение, 1978-1981.
- Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е.* Динамика частиц при воздействии вибрации. Киев: Наукова Думка, 1975. 168 с.
- Гласс И.И.* Ударные волны и человек. М.: Мир, 1977. 191 с.
- Гольдин С.В.* Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5. № 5. С. 5-22.
- Горелик Г.С.* Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. М.; Л.: Гос. изд-во технико-теоретич. литературы, 1950. 551 с.
- Горшков Г.П.* Региональная сейсмоструктура территории юга СССР: Альпийский пояс. М.: Наука, 1984. 272 с.
- Гохберг М.Б., Рогожин Е.А., Гусева Т.В. и др.* Реакция геологических структур на импульсное воздействие крупных взрывов // Геотектоника. 1988. № 5. С. 3-14.
- Дядьков П.Г., Мельникова В.И., Саньков В.А. и др.* Современная динамика Байкальского рифта: эпизод сжатия и последующее растяжение в 1992-1996 годах // Докл. РАН. 2000. Т. 372. № 1. С. 99-103.
- Добрецов Н.Л.* Эволюция структур Урала, Тянь-Шаня и Алтае-Саянской области в Урало-Монгольском складчатом поясе (Палеоазиатский океан) // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 1-2. С. 5-27.
- Ениколопян Н.С., Мхитарян А.А., Карагезян А.С.* Сверхбыстрые химические реакции в твердых телах // Докл. АН СССР. 1986. Т. 288. № 3. С. 657-660.
- Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1978. 192 с.
- Иванов Б.А.* Геологическое и геохимическое воздействие метеоритных ударов: кратер Чиксулуб // Динамические процессы в геосферах: геофизика сильных возмущений. М.: Наука, 1994. С. 150-156.
- Кноулз К., Брод Г.* Теория процессов кратерообразования (обзор) // Удар, взрыв и разрушение. М.: Мир, 1981. С. 8-42.
- Котляр П.Е., Ким В.И.* Положение полюса и сейсмическая активность Земли. Новосибирск: ОИГТМ СО РАН, 1994. 123 с.
- Кузнецов В.В.* Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли // Успехи физических наук. 1997. Т. 167. № 9. С. 1001-1012.
- Курленя М.В., Опарин В.Н., Ревуженко А.Ф., Шемякин Е.И.* О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне // Докл. АН СССР. 1987. Т. 293. № 1. С. 67-70.
- Летников Ф.А.* Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 231 с.
- Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
- Мосинец В.Н., Шемякин Е.И.* Исследование в области сейсмоки взрывов в горной промышленности // ФТПРПИ. 1974. № 4. С. 59-64.
- Нестеренко В.Ф., Чиков Б.М.* Механизмы перераспределения и концентрации элементов при импульсном нагружении // Сдвиговой метаморфизм и рудоконтролирующие парагенезы. Новосибирск: ОИГТМ СО РАН, 1992. С. 36-37.
- Новые геотехнологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер. Вибрационные технологии / Отв. редактор Н.П. Лаверов. М.: Изд. Регион. общ. орган. по пробл. прикладной геофизики, 2002. 470 с.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 535 с.
- Одесский И.А.* Волновые движения земной коры. Л.: Недра, 1972. 207 с.
- Опарин В.Н., Акинин А.А., Востриков В.И., Юшкин В.Ф.* О деформационно-волновых процессах в окрестности взрывов // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5. № 5. С. 43-49.
- Пирс Дж.* Почти все о волнах. М.: Мир, 1976. 176 с.
- Проблемы планетарной геологии. М.: Гос. научно-техн. изд. литер. по геол. и охране недр, 1963. 343 с.
- Ревуженко А.Ф.* О деформировании сыпучей среды // ФТПРПИ. 1980. № 3. С. 3-16; 1980. № 6. С. 8-16.
- Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б., Шемякин Е.И.* О механизмах деформирования сыпучего материала при больших сдвигах // ФТПРПИ. 1974. № 3. С. 37-43.
- Ризниченко Ю.В.* Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.
- Ружич В.В., Псахье С.Г., Борняков С.А. и др.* Изучение влияния виброимпульсных воздействий на режим смещения в зонах сейсмоактивных разломов // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 6. № 1. С. 41-53.
- Садовский М.А.* Естественная кусковатость горной породы // Докл. АН СССР. 1979. Т. 274. № 4. С. 829-831.
- Садовский М. А., Писаренко В. Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.

- Собственные колебания Земли / Ред. В.Н. Жарков. М.: Мир, 1964. 315 с.
- Стейси Ф.* Физика Земли. М.: Мир, 1972. 342 с.
- Табулевич В.Н.* Комплексные исследования микросейсмических колебаний: штормовые микросейсмические колебания и комплекс явлений, возникающих одновременно с ними в атмосфере-гидросфере. Новосибирск: Наука, 1986. 151 с.
- Табулевич В.Н., Черных Е.Н., Дреннова Н.Н., и др.* Действие вибраций (микросейсм) и микробаром штормового происхождения на сейсмические очаги и верхнюю атмосферу // Геология, геохимия и геофизика на рубеже XIX и XX веков. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2002. 543 с.
- Федотов С.А., Хубуная С.А., Жаринов Н.А. и др.* Извержения вулканов Шивелуч и Ключевской в 1993 г. и их влияние на окружающую среду // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 8. С. 117-131.
- Цареградский В.А.* К вопросу о деформациях земной коры // Проблемы планетарной геологии. М.: Гос. научно-техн. изд. литер. по геол. и охране недр, 1963. С. 149-221.
- Челомей В.Н.* Парадоксы в механике, вызываемые вибрацией // Докл. АН СССР. 1983. Т. 270. № 1. С. 62-67.
- Чиков Б.М.* Сдвиговое стресс-структурообразование в литосфере: разновидности, механизмы, условия (обзор проблемы) // Геология и геофизика. 1992. № 9. С. 3-38.
- Чиков Б.М.* Гипотеза стресс-метаморфической концентрации рудных элементов в земной коре // Сдвиговый метаморфизм и рудоконтролирующие парагенезы. Новосибирск: ОИГТМ СО РАН, 1992. С. 36-37.
- Чиков Б.М.* Геодинамические механизмы рудоконцентраций в региональных зонах смятия (на примере Южной Сибири) // Металлогения, нефтегазоносность и геодинамика Северо-Азиатского кратона. Иркутск: ИЗК СО РАН, 1998. С. 81-89.
- Чиков Б.М.* Режимы колебаний и волн в геосферах // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. Тр. Всерос. совещ. Новосибирск: СО РАН, 2003. С. 209-211.
- Bukhnam R.G.* Geologic effects of the BENHAM of the underground nuclear explosion, Nevada Test Site // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1969. V. 59. № 6. P. 2209-2220.
- Geer J.M., Shah H.C.* Terra non firma. Understanding and preparing for Earth-quakes. New York: W.H. Freeman and Company, 1984. 220 p.
- Gubbins D.* Energetics of the Earth's core // J. geophys. 1977. V. 43. P. 453-464.
- Kotlyar P.E., Kipriyanov A.I., Chikov B.M.* Vibratory simulation of extension and compression structures in sedimentary basins // Abstracts. 30<sup>th</sup> IGC, Beijing, China. 1996. Vol. 1 of 3. P. 360.
- Zhmodik S., Verkhovtseva N., Chikov B. et al.* Shock induced Au redistribution in porous Q-Py mixture // Bull. Amer. Physical Soc. 2003. Vol. 48. № 4. P. 75.

*Рецензент член-корр. РАН В.Н. Пучков*