

Родионов В.Н.

ОЧЕРК ГЕОМЕХАНИКИ

(натурфилософия)

Москва
Научный Мир
1996

Вступление	3
Введение	4
1. Среда обитания человека.	4
2. Естествознание.	4
Идеальный газ.	5
Идеальная жидкость.	6
Идеальное твердое тело.	9
Пылевое облако в собственном гравитационном поле.	13
Глава I. Вечное движение.	18
Глава II. Структуры твердого тела	21
1. Динамическая структура реального упругого тела.	21
2. Структура разрушения твердого тела.	25
3. Медленное движение в твердых телах.	28
Глава III. Проблемы и решения	31
1. Парадоксы разрушения твердого тела.	31
2. Сейсмический режим и структура разрушения.	35
3. Критерии медленного движения и дезинтеграции среды в земных недрах.	38
4. О режиме оползней на горных склонах.	41
5. Горизонтальные слои нарушенной сплошности в земной коре.	43
Глава IV. Дифференциация вещества в Земле	45
Глава V. Гидродинамическая сеть Земли	53
Глава VI. Естественные тела	57
Вместо заключения	59
1. О стационарной Вселенной.	59
2. О роли биосферы в жизни Земли.	60
3. О натурфилософии.	61
Литература	62

*"...он руководствовался большей
частью здравым смыслом,
путеводителем редко верным и
почти всегда недостаточным..."*

А.С. Пушкин

Вступление

Глубокое разделение труда на производстве и в науке, обилие профессиональных языков ограничило общение творческих личностей, сузили круг их интересов; в условиях жесткой регламентации жизни людей и снижения культурных запросов стала беззастенчиво проявлять себя потребительская психология в отношении природы.

Огромные достижения в отдельных областях технического творчества способствовали преувеличению роли специальных знаний, критерием ценности которых была полезность их в приобретении человеком все новых и новых материальных благ. В обществе ослабевал интерес к целостному восприятию мира. Теоретические обобщения оставались достоянием специалистов. Укреплялись позиции примитивного прагматизма, с одной стороны, и мистицизма, с другой.

Признаки духовного обнищания с расцветом промышленной цивилизации отмечались давно, но в XX веке человечество ощутило угрозу глобального экологического кризиса, опасность которого до сих пор в полной мере не осознается. Ответственность за сложившееся положение в обитаемом мире должны разделить и социальные органы, ведающие просвещением.

Введение

1. Среда обитания человека.

Человека выделяет из природной среды разум, который позволяет людям использовать опыт, накопленный предшествующими поколениями, для прогнозирования отдаленных последствий своей деятельности, обеспечивая воспроизводство среды обитания для будущих поколений и продолжения рода людского.

В общении людей одного поколения, в освоении опыта своего и прошедших поколений, в разработке методов обобщения опыта и средств хранения необходимого для жизни людей Знания возникло нечто нематериальное, которое можно обозначить как духовную сферу среды обитания человека. В настоящее время она вмещает религии, все искусства и науку. Духовная сфера имеет множество измерений и непрерывно приобретает новые, рождаемые человеческим Гением.

Предоставляя человеку беспредельные возможности для творчества, духовная сфера одновременно вырабатывает свои внутренние законы гармонии, препятствующие ее распаду и деградации. Целостность духовной сферы осознается человеком как высший Разум, служение которому и является смыслом его жизни.

Первоначально духовная сфера тяготела к тем источникам эмпирического знания, которыми наделила человека Природа. В настоящее время естествознание, несмотря на свое быстрое развитие, занимает в духовной сфере слишком малое место и не оказывает должного влияния на господствующее в обществе мировоззрение.

2. Естествознание.

Духовная сфера обитания человека свидетельствует о многоплановом восприятии мира: искусство и религия дают возможность отдельной личности ощутить свое единение с природой и всем человеческим родом, естествознание вооружает человека обобщенным опытом общения с вещественным миром. Методология преобразования эмпирических данных в научное знание заключается в построении моделей физических тел, явлений и процессов их взаимодействия. Модели не являются копиями природных объектов, а выражают лишь главные характерные свойства их, отвлекаясь от множества деталей. На моделях исследуются возможные проявления этих свойств в разных условиях под воздействием различных агентов. Эта методология оказалась довольно плодотворной, обеспечивая достоверное знание за пределами области непосредственного опыта.

Современные модели часто воплощают идеи и образы, сложившиеся в древнем мире, что свидетельствует о стремлении к целостности духовной сферы, к сохранению ее структур.

В механике, которая изучает простейшие формы движения, постоянно обращаются к идеям дискретности и непрерывности, летучести, текучести и

твердости, тяжести и невесомости, которые приобретают свое конкретное содержание и меру применительно к различного рода телам и явлениям.

Так, например, идея атомов, неделимых частиц, из которых построены материальные тела, имеют сегодня весьма различное толкование, являясь носителями отличительных свойств: нуклоны определяют свойства атомов, атомы - химических элементов, молекулы - химических соединений, клетки - живых организмов.

Свойства материальных тел зависят не только от атомов, имея в виду все виды их, но и от их взаимного расположения и характера их движения.

В механике нашли широкое применение модели идеального газа, жидкости и твердого тела.

Рассмотрим подробнее эти модели и таким образом подготовимся к обсуждению моделирования объектов геомеханики и проблемы воспроизводства среды обитания человека.

Идеальный газ.

В модели одноатомного идеального газа частицы обмениваются кинетической энергией только в результате столкновений друг с другом. Если частицы находятся в замкнутом теплоизолированном объеме, то средние по времени скорости движения всех частиц одинаковы и постоянны.

Сталкиваясь со стенками, ограничивающими объем, частицы передают им импульс, что воспринимается как давление газа (p).

Для характеристики энергии хаотического движения атомов в единице объема используют температуру (T), величина которой пропорциональна квадрату средней скорости атомов. Обмен энергией газа с неподвижными стенками происходит до тех пор, пока их температуры различаются: энергия передается от тела с высокой температурой к телу холодному. Этот опытный закон используется в различных приборах, измеряющих температуру газа, а, следовательно, и энергию движения атомов в газе.

Кроме давления и температуры для характеристики свойств газа используют плотность (ρ): суммарную массу частиц, находящихся в единице объема. Число частиц в единице объема газа при фиксированных давлении и температуре одинаково для всех газов, так что плотность газа пропорциональна массе отдельного атома. Хотя расстояние между атомами в газе при атмосферном давлении примерно в 10 раз больше, чем в твердом теле, эти расстояния настолько малы, что в обыденной жизни человека газ воспринимается как сплошная упругая материя, свободно заполняющая все свободное пространство, - некое подобие эфира, образа, рожденного воображением еще в древности.

В газе все его свойства могут быть выражены через параметры движения атомов, которые обладают кинетической энергией и количеством движения (импульсом). Работа, совершаемая над газом или самим газом, (сжатие его или расширение), приводит к изменению не только плотности, но и давления и температуры. Взаимосвязь этих параметров газа называют его уравнением состояния:

$$P/\rho = nkT$$

Здесь n - число частиц в единице объема, P - давление на единицу площади, T - температура и k - постоянная Больцмана.

Макроскопическое движение сжимаемого газа может рассматриваться как механическое течение сплошной среды, если задана связь $p = p(\rho)$, т.е. известен механизм обмена энергией между "газовыми" частицами. Однозначная связь $p = p(\rho)$ при макроскопическом движении реального газа может нарушаться по многим причинам.

В многоатомных молекулах число степеней свободы заметно возрастает: к трем поступательным (как у атома) добавляются три вращательных степени свободы, а также колебательные. При возбуждении колебаний молекула может развалиться на части, и тогда образуются новые частицы. С другой стороны, при низких температурах часть колебательных степеней свободы остаются "замороженными" и не участвуют в энергообмене. Столкновение быстрых атомов может приводить к отрыву электронов и образованию электрически заряженных частиц. Наконец, тепловое излучение нагретого газа уносит часть энергии за пределы движущегося газа. Казалось бы, отмеченные "несовершенства" реальных газов сильно сужают область применения модели идеального газа. Однако это не так. Успешное применение модели идеального газа в ее простоте: все свойства газа и его поведение определяются через кинетическую энергию, которая распределена поровну между степенями свободы атомов и само макроскопическое движение не изменяет процесса межатомного обмена энергией. Канонизировав свойства идеального газа и исследовав на модели типовые процессы, удалось изучить и понять многие "несовершенства" реальных газов путем сопоставления их с идеальным газом. В этом, может быть, и состоит главное достоинство избранного наукой пути познания окружающего нас материального мира - через построение и исследование моделей.

Идеальная жидкость.

Модель идеальной жидкости воплощает идею текучести. Незменная плотность, отсутствие вязкости, растекание на горизонтальной плоскости под действием собственного веса, прочная связь жидких частиц, обеспечивающая сплошность текущей жидкости, - эти свойства идеальной жидкости реализуются в широком классе макроскопических движений, в данном случае, течений. Жидкие частицы обладают только кинетической и потенциальной энергией, так что сохранение энергии механического движения тем самым предопределено.

В тех случаях, когда перемещение частиц жидкости свидетельствует об отсутствии вихрей, а течение задано формой сосуда или канала, параметры течения предсказуемы.

Идеальная жидкость позволила исследовать множество сложных гидродинамических задач, имеющих важное значение для практики. Вместе с тем идеальная жидкость допускает существование вихревых структур, которые проливают свет на интегральные механические свойства сплошных сред в природных условиях. В идеальной жидкости движение хорошо обтекаемого тела при небольших скоростях не испытывает никакого сопротивления: траектория движения жидких частиц, огибающих сферическое тело, совершенно

симметрична, а значит давления на фронтальной и тыльной поверхности одинаковы. Отсутствие вязкости исключает и трение жидких частиц о боковые поверхности.

При больших скоростях за движущимся телом возникает кавитационная полость в жидкости, где давление равно нулю, так что сопротивление движению тела определяется давлением на фронтальной поверхности. Траектории движения жидких частиц, которые оказались на границе кавитационной полости, сходятся на некотором удалении от тела и выбрасываются в виде струи вслед телу.

Если в какой-то момент убрать обтекаемое тело, то возникшая структура течения продолжит свое существование. При этом внутренние слои (прилегающие к полости) образуют замкнутое само на себя течение: возникающая при схождении траекторий движущихся частиц струя, внедряясь в покоящуюся жидкость, будет исполнять роль обтекаемого тела. Далее жидкие частицы струи растекаются по поверхности полости и снова сходятся в тыльной части движущейся полости, в которой, напомним, давления нет.

На внешней границе замкнутого вихревого течения скорости равны скорости движения обтекающей этот вихрь жидкости. В результате образования кавитационного вихря возникает структура, разделяющая жидкие частицы кинематически: сосуществуют два разнородных течения, частицы которых не смешиваются и не обмениваются энергией.

Если бы эта парадоксальная ситуация не имела бы шансов возникнуть в реальной неидеальной жидкости, то она не представляла бы, пожалуй, даже теоретического интереса. Однако, описанная выше кинематика движения кавитационного вихря практически не нуждается ни в одном из фундаментальных свойств идеальной жидкости, кроме несжимаемости. Значит, такие структуры возможны, и это было недавно доказано опытами.

Размеры кавитационного вихря меняются с давлением в обтекающей его жидкости: объем уменьшается с ростом давления и увеличивается с падением. Присутствие таких вихревых структур в идеальной жидкости придает ей свойства сжимаемой упругой среды.

На свободной поверхности идеальной жидкости в поле силы тяжести за любым плавущим телом возникают гравитационные волны. Амплитуда колебания жидких частиц в этих волнах убывает с удалением от поверхности тем быстрее, чем короче длина волны. Скорость распространения поверхностных волн пропорциональна корню квадратному из длины волны, помноженной на ускорение силы тяжести.

На образование этих волн расходуется энергия плавущего тела, а следовательно, оно испытывает сопротивление поступательному движению. Успокоение возмущенной поверхности идеальной жидкости может достигаться рассеиванием гравитационных волн по безграничной поверхности. Другого механизма гашения колебаний в идеальной жидкости нет.

Перемещение любого жесткого тела внутри сосуда, полностью заполненного жидкостью, вынуждает перемещаться каждую жидкую частицу в объеме сосуда - следствие несжимаемости жидкости. Если это тело движется по замкнутой траектории, то жидкие частицы, где бы они не находились, после каждого цикла будут перемещаться в новое положение, перемешивая жидкость во

всем объеме сосуда. Макроскопическое движение отдельных объемов несжимаемой жидкости жестко связано с движением всех частиц в замкнутом объеме.

В сжимаемой жидкости любое изменение механического движения в некоторой точке пространства рождает волну возмущения, фронт которой распространяется со скоростью звука. За пределами этой возмущенной области жидкие частицы о свершившемся событии ничего не знают. Таким образом в сжимаемой жидкости осуществляется в некотором смысле пространственное структурирование жидкого тела. Наиболее четко это проявляется в сверхзвуковых течениях, где области разграничены непроницаемыми для возмущений ударными волнами.

Напоминание об особенностях сверхзвуковых течений и возмущениях, которые всегда присутствуют в движущейся сжимаемой жидкости, полезно для определения области применимости модели идеальной жидкости, которую иногда можно рассматривать как предельный переход реальной сжимаемой жидкости при стремлении в ней скорости звука к бесконечности.

Структурирование идеальной жидкости даже при сохранении таких свойств как несжимаемость и отсутствие вязкости приводит к несохранению механической энергии в потоке жидкости.

Отсутствие молекулярной вязкости предопределяет повсеместное и постоянное возникновение вихревого движения в потоке жидкости. Естественно полагать, что развитие вихревой структуры происходит, начиная с крупных вихрей, которые генерируют мелкие, а они - еще более мелкие и т.д. В этом же направлении идет перераспределение механической энергии потока. Поскольку в идеальной жидкости нет какого-либо ограничения, определяющего минимальный размер вихря, этот процесс структурирования можно продолжать до бесконечности. Стационарная вихревая структура будет иметь место при условии, что энергия, передаваемая в единицу времени на каждом масштабном уровне, одинакова.

Обозначим радиус вихря i -ого уровня r_i ; а его кинетическую энергию E_i . По порядку величины $E_i \approx \rho v_i^2 r_i^3$, где v_i - скорость движения жидких частиц в вихре на фоне макроскопического переноса вихревой структуры. Характерное время передачи энергии вихрю определяется периодом обращения жидких частиц в вихре $2\pi r_i / v_i$.

Предположим, что вихри каждого размера занимают одинаковую долю объема жидкости. Тогда число вихрей одного размера будет пропорционально $1/r_i^3$.

Поток энергии, передаваемый от вихрей одного уровня к другому, к вихрям меньшего размера, должен быть пропорционален энергии вихря, их числу и обратно пропорционален времени передачи энергии:

$$\rho v_i^2 r_i^3 \frac{v_i}{2\pi r_i} \frac{1}{r_i^3} = \frac{\rho v_i^3}{2\pi r_i} = const$$

$$v_i^3 \sim r_i$$

Отсюда следует, что в стационарном потоке механической энергии, протекающем через вихревую структуру, суммарная энергия вихрей одного размера будет убывать с уменьшением r_i

$$\rho v_i^2 r_i^3 (1/r_i^3) = \rho v_i^2 \sim \rho r_i^{2/3}.$$

Суммарная энергия всей вихревой структуры в рамках сделанных предположений будет по порядку величины равна кинетической энергии потока, породившего эту структуру. Несмотря на то, что в идеальной жидкости отсутствует вязкость, вихревая структура, потребляя энергию и перекачивая ее во все более мелкие вихри, гасит движение крупномасштабных вихрей и тормозит тот поток, который вихри породил. В целом идеальная жидкость с вихревой структурой вполне может моделировать движение вязкой жидкости на макроуровне.

Вихревое движение может нарушить сплошность жидкости. Хотя скорость движения жидких частиц с уменьшением размера вихря уменьшается ($v_i \sim r_i^{1/3}$), центробежные силы $\rho(v_i^2/r_i) \sim 1/r_i^{1/3}$ растут и могут превысить не только давление в жидкости, но и силы сцепления. В отличие от идеальной жидкости вода, например, в естественных условиях имеет прочность на разрыв, измеряемую единицами кг/см².

Идеальное твердое тело.

Недеформируемое твердое тело имеет три поступательные степени свободы и три вращательные (для тела с осевой симметрией). Макроскопическое движение твердого тела заметно отличается от движения материальной точки. Достаточно сравнить движение по наклонной плоскости материальной точки и шарика или шарика и сферической оболочки того же размера и веса, чтобы ощутить значение пространственного распределения массы в твердом теле. Если тело имеет более сложную форму, то распределение энергии между степенями свободы может быть различным, а потому движение тела в поле силы тяжести может эволюционировать во времени.

Деформируемое твердое тело изменяет свою форму под действием внешних сил. Способность противодействовать изменению формы обусловлена внутренними связями между частями тела.

При малой деформации твердого тела в нем возникают внутренние напряжения, уравнивающие действие внешних сил, которые исчезают как только прекращается действие внешних сил. В том случае, когда с исчезновением внутренних напряжений тело восстанавливает первоначальную форму, имеет место совершенная упругость тела.

Сформулированный Гуком закон линейной пропорциональности упругих напряжений и деформаций лег в основу модели идеального упругого тела.

Возьмем изотропный упругий кубик, в одном из восьми углов поместим начало координат, а координатные оси направим вдоль ребер кубика, обозначив их x, y, z . Деформация такого кубика будет характеризоваться следующими величинами: удлинение тела вдоль осей u_i , принимающее по трем осям вид u_x, u_y, u_z , обозначает перемещение точек внутри кубика в направлении одной из осей при фиксированном положении начала координат.

Относительное удлинение тела вдоль оси x :

$$u_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}$$

Запись в виде производной предполагает существование удлинения сколь угодно малого по размеру кубика. Аналогично можно характеризовать удлинение кубика по двум другим осям

$$u_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad u_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z};$$

Разумеется, указанная деформация при изменении знака на минус будет означать укорочение.

Искажение формы кубика характеризуется деформацией сдвига; точки, расположенные на прямой линии, параллельной одной из осей, например x , по мере удаления от начала координат все более смещаются в направлении оси y .

$$u_{xy} = u_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)$$

(Обычно используется симметричная форма.)

Аналогично записываются остальные сдвиговые деформации:

$$u_{xz} = u_{zx}; \quad u_{zy} = u_{yz}$$

Внутренние напряжения в кубике характеризуются силами, которые нужно приложить к граням кубика, чтобы получить измеряемую деформацию. На каждой плоской поверхности можно задать три силы: действующую по нормали к поверхности, которая обозначается направлением нормали, и двумя взаимно перпендикулярными силами, лежащими в плоскости. Отнесенные к единице площади, эти силы называются напряжениями.

В рассматриваемом кубике на грани, нормаль к которой направлена вдоль оси x , эти три напряжения можно записать в виде: σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{xz} .

Линейная связь между напряжениями и деформациями в упругом теле Гука имеет вид:

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} [(1-\sigma)u_{xx} + \sigma(u_{yy} + u_{zz})]$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} [(1-\sigma)u_{yy} + \sigma(u_{zz} + u_{xx})]$$

$$\sigma_{zz} = \frac{E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} [(1-\sigma)u_{zz} + \sigma(u_{xx} + u_{yy})]$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E}{1+\sigma} u_{xy}; \quad \sigma_{yz} = \frac{E}{1+\sigma} u_{yz}; \quad \sigma_{zx} = \frac{E}{1+\sigma} u_{zx};$$

Приведем формулы для деформаций через напряжения, получаемые алгебраическим преобразованием представленных выше:

$$u_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \sigma(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})]$$

$$u_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \sigma(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})]$$

$$u_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \sigma(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})]$$

Рис.1.

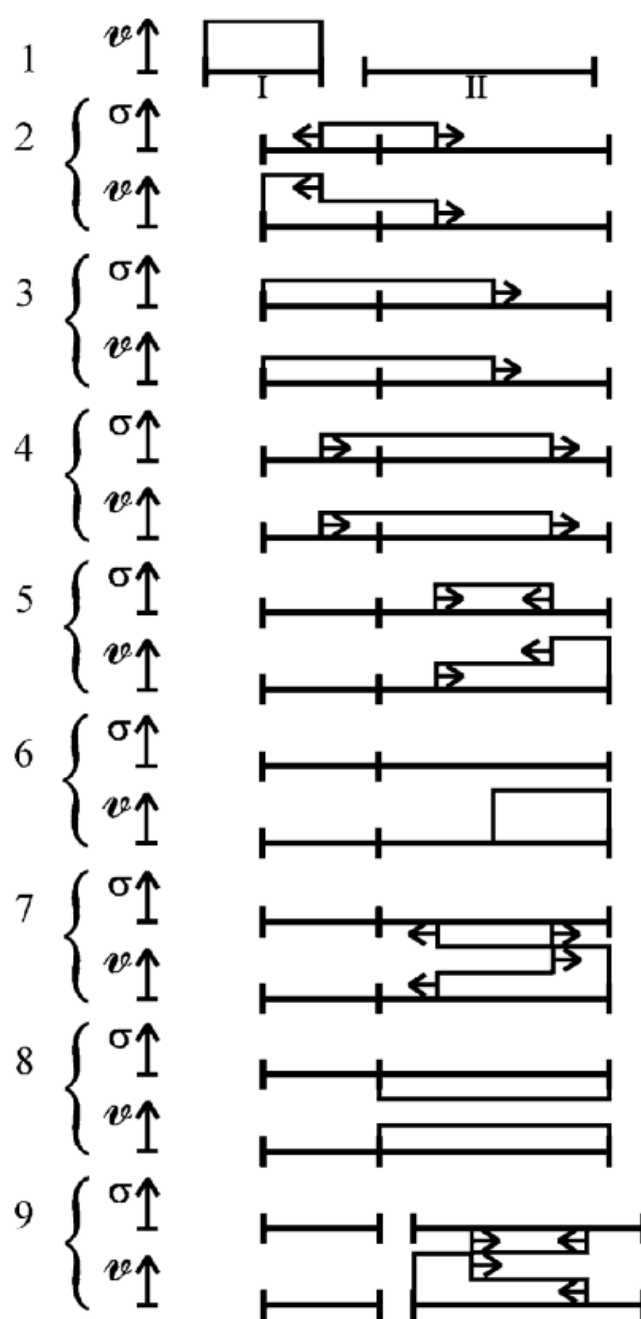
Столкновение стержней I и II

Стержень I движется со скоростью $2v$ и сталкивается со стержнем II

В обоих стержнях возникают упругие волны, которые тормозят I и разгоняют II.

Волновое движение в последовательные моменты времени представлено эпюрами массовых скоростей v и напряжений σ .

Направление движения фронта волны показано стрелочками.



Во всех формулах содержатся две экспериментально определяемые константы, характеризующие упругие свойства материала: E - модуль Юнга и σ - коэффициент Пуассона.

Модуль Юнга, как следует из последних формул, определяется путем растяжения или сжатия стержня, когда на боковой поверхности нет напряжений. При растяжении по оси "х":

$$u_{xx} = \frac{1}{E} \sigma_{xx} \quad (\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0)$$

В этих же экспериментах определяется и коэффициент Пуассона: в отсутствие боковых напряжений

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} [(1-\sigma)u_{yy} + \sigma(u_{zz} + u_{xx})] = 0$$

$$u_{yy} = u_{zz}$$

Отсюда получаем: $u_{yy} = u_{zz} = -\sigma u_{xx}$. Стержень при растяжении уменьшается в поперечном сечении так, что отношение деформаций равно σ . Для изотропной среды эти два параметра полностью характеризуют упругие свойства. Физически более ясными являются: модуль объемного сжатия K и модуль сдвига μ , которые выражаются через E и σ следующим образом:

$$K = \frac{E}{3(1-2\sigma)}; \quad \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}.$$

Заметим, что коэффициент Пуассона не может быть больше 0,5, т.к. при этом знаменатель формулы для объемного модуля обращается в нуль, а значит, должен обращаться в нуль и модуль Юнга, и модуль сдвига. Твердое тело перестает быть твердым.

Плотность вещества и упругие свойства определяют скорость распространения волн в твердом теле. В безграничной среде возможны два вида волн: продольные, когда смещение частиц в волне происходит в направлении распространения волны и поперечные, когда смещение частиц перпендикулярно к направлению распространения волны.

$$\text{Скорость продольной волны } C_l = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

$$\text{Скорость поперечной волны } C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}}$$

В телах конечных размеров различной формы могут возникать специфические волны, скорость распространения которых может заметно отличаться от скоростей в неограниченной среде: поверхностные волны разных типов, изгибные волны в пластинах и стержнях, крутильные и т.п.

На границах тела происходит преломление и отражение волн, так что первоначально простейший по форме волновой импульс, бесконечно отражаясь от границ тела, возбуждает в теле широкий спектр колебаний, стремясь распределить свою энергию между огромным числом степеней свободы твердого тела. Надо учесть, что высокочастотные колебания могут рассеиваться зернистой структурой поликристаллических тел, всевозможными неоднородностями

строения и дефектами решетки кристаллов. В этом отношении энергоемкость твердого тела очень велика.

В идеальном упругом теле поглощение механической энергии невозможно, есть только ее рассеяние. Колебательные движения твердого тела и его движение как целого определяют все возможные его состояния.

Если тело свободно, по инерции движется в пространстве, кинетическая энергия его движения как целого сохраняется, так что о колебательном движении тела можно забыть. Однако при взаимодействии двух таких тел между собой возможно часть энергии поступательного движения передать внутренним степеням свободы, так что возникнет сомнение в идеальной упругости тел. На рис.1 в качестве иллюстрации показан волновой механизм передачи энергии при столкновении от короткого стержня, который имел скорость $2v$, к стержню в 2 раза большей длины. Если в начальный момент вся энергия заключена была в кинетической энергии I стержня, то в момент их разбегания эта энергия оказалась распределена поровну между кинетической энергией поступательного движения и упругой энергией растянутого II стержня. Если о результатах соударения судить по скорости движения центра масс стержня, то обнаружится "потеря" 50% начальной энергии.

Начавшийся колебательный процесс во II стержне будет направлен на рассеяние первоначально простого волнового импульса и возбуждение широкого спектра колебаний, которые в идеальном, не имеющем механизма поглощения механической энергии твердом теле сформируют со временем устойчивую динамическую структуру. В телах правильной формы будут в спектре выделяться собственные частоты тела и обертона.

Передача энергии от низкочастотных колебаний к высокочастотным в идеальных твердых телах ничем не ограничена. Поэтому иерархическая структура колебаний способна "поглотить" большое количество энергии и в рассмотренном примере столкновения стержней таким путем колебательный процесс во II стержне может быть погашен.

Представляет большой интерес само функционирование иерархической динамической структуры в стационарном или квазистационарном режиме, когда поток механической энергии, распределяемый структурой, питается от большого источника, истощение которого в течение жизни структуры практически незаметно.

Пылевое облако в собственном гравитационном поле.

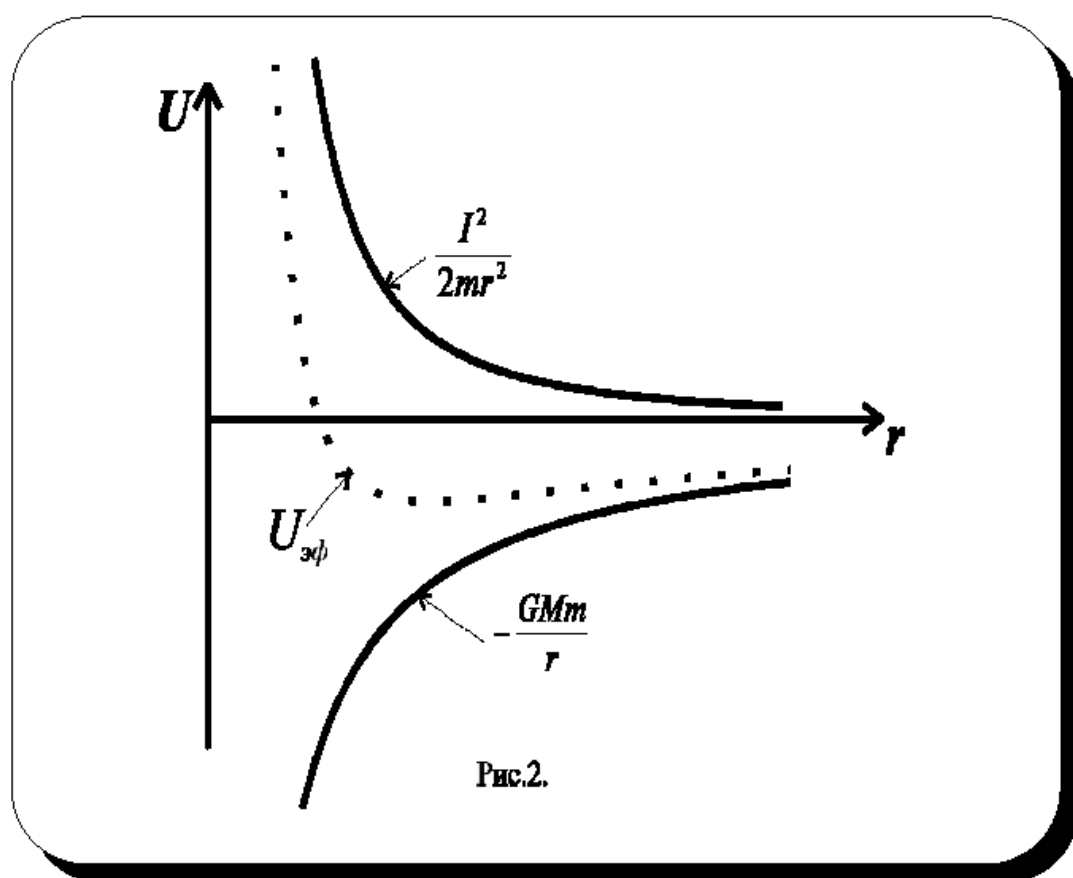
Напомним, что в соответствии с Законом всемирного тяготения две массы притягиваются друг к другу с силой:

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

Здесь $G = 6,67 \cdot 10^{-8}$ эрг·см/г²; m и M измеряются в граммах, r -в см. и F в динах. Сила взаимодействия направлена по линии, соединяющей центры масс.

Гравитационное поле характеризуется потенциалом

$$U = -\frac{GMm}{r} \quad \left(F = \frac{\partial U}{\partial r} \right)$$



В случае, когда $M \gg m$, движение взаимодействующих тел упрощается: массивное тело можно считать неподвижным, а вся кинетическая энергия заключена в легком теле. Движение последнего зависит от величины момента количества движения $I = mr^2 \dot{\phi}$ ($\dot{\phi}$ - угловая скорость).

Гравитационные силы, действующие между сферическими недеформируемыми телами, не могут изменить момент количества движения, так что с изменением расстояния r часть потенциальной энергии оказывается "связанной" условием постоянства I . Вычитая ее, получим эффективную потенциальную энергию:

$$U_{\text{эф}} = \frac{1}{2} \frac{I^2}{mr^2} - \frac{GMm}{r}$$

Изображенная на рис.2 $U_{\text{эф}}(r)$ свидетельствует о возникновении сил отталкивания, которые препятствуют сближению тел: сохранение момента количества движения приводит к быстрому возрастанию кинетической энергии и центробежных сил при сближении.

Если при заданном моменте количества движения суммарная энергия тела m (гравитационная плюс кинетическая) больше нуля, то траектория движения его - гипербола, если равна нулю - парабола, если меньше нуля, но больше $U_{\text{эф}}$ в точке минимума - эллипс.

Наличие сил "отталкивания" позволяет взаимодействующим телам в космосе обмениваться энергией и импульсом как при упругом соударении атомов в газе.

Пылевое облако, удерживаемое собственным гравитационным полем, при определенных условиях может уподобиться идеальному газу. Скорость относительного движения частиц (V) в газообразном теле определяет внутреннюю энергию - энергию хаотического движения. Радиус эффективного гравитационного взаимодействия частиц (L) можно оценить из условия равенства ускорения тяготения и центробежного ускорения:

$$\frac{GM}{L^2} = \frac{V^2}{L}; \quad L = \frac{GM}{V^2}$$

Приняв плотность частиц равной плотности воды (1 г/см^3) и обозначив линейный размер частиц l , получим

$$L = \frac{Gl^3}{V^2}$$

Если радиус взаимодействия $L \leq l$, то гравитационное притяжение частиц будет приводить к их столкновению и слипанию. Так при скорости 100 см/сек размер слипающихся частиц будет равен:

$$l = L = \frac{6,67 \cdot 10^{-8} \cdot l^3}{10^4}; \quad l^2 = 0,15 \cdot 10^{12}$$

$$l = L = 0,4 \cdot 10^6 \text{ см} = 4 \text{ км.}$$

Для всех частиц $l < L$ прямое столкновение практически исключено, и их механическое взаимодействие можно рассматривать как упругое соударение, при котором энергия сохраняется.

Другим условием, обязательным для существования газа является интенсивный обмен энергией и импульсом между всеми частицами, что обеспечивает распределение энергии по степеням свободы. Другими словами, длина свободного пробега частиц от столкновения до столкновения должна быть много меньше размера газообразного тела. Последнее условие трудновыполнимо и может иметь место в скоплении весьма крупных космических тел, размеры которых превосходят многие тысячи километров.

Внутри этого интервала тела размером от километра до 1000 километров могут образовывать облака, движение каждого тела определяется только гравитационным полем облака как целого, а взаимодействием гравитационным между телами можно пренебречь. В известном смысле движение тел в таком облаке будет подобно движению атомов в сильно разреженном газе, когда длина свободного пробега соизмерима или больше размера сосуда.

В качестве примера, удобного для количественных оценок, рассмотрим параметры исходного облака твердых тел из которого формировались планеты Солнечной системы.

Несколько округляя, примем общую массу облака (всех планет) равной $M = 2 \cdot 10^{30} \text{ г}$, а момент количества движения облака $I = 1 \cdot 10^{30} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с}$. Будем считать, что масса внутри сферического облака распределена равномерно с плотностью $\bar{\rho}$.

Сохранение момента количества движения в этом случае позволяет связать угловую скорость ($\dot{\Phi}$) с размерами R_0 : $(2/5)MR_0^2\dot{\Phi} = 2 \cdot 10^{50}$.

Средняя кинетическая энергия частиц в облаке, удерживаемом собственным гравитационным полем, равна:

$$\frac{MV^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{5} \cdot \frac{GM^2}{R_0}$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{3}{5} \cdot \frac{GM}{R_0}}$$

Если теперь принять $\dot{\Phi} \approx V_0/R_0$, то выписанные выше соотношения позволяют оценить одновременно и R_0 и V_0 :

$$R_0 = 10^{18} \text{ см}; V_0 = 300 \text{ см/с.}$$

При этом средняя плотность в облаке:

$$\bar{\rho} = \frac{2 \cdot 10^{30}}{4 \cdot 10^{54}} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3$$

Полагая плотность вещества в частицах равным 1 г/см^3 , оценим размеры частиц, которые при столкновении слипаются:

$$\frac{Gl^3}{L} = V^2; L = l; l^2 = \frac{V^2}{G} = \frac{10^5}{6,67 \cdot 10^{-8}} = \frac{3}{2} \cdot 10^{12}$$

$$l \cong 10^6 \text{ см} = 10 \text{ км.}$$

Это верхняя граница. Будем полагать что это максимальный размер частиц того пылевого облака, из которого затем формировалась планетная система.

Спектр частиц по размеру, возникающих при дроблении твердого тела, может быть представлен в виде распределения:

$$n_i l_i^3 = n_0 l_0^3 \quad l_0 = l_0(1 + i),$$

где n_i - число частиц размером l_i . Суммарные объемы частиц каждой из фракций равны между собой. Число таких фракций порядка 10^2 , так что размер наименьшей частицы отличается от размера наибольшей в 10^2 раз.

$$l_{\max} = 100 l_0.$$

В разреженном начальном состоянии облако само по себе эволюционировать практически не может, т.к. длины свободного пробега частиц превосходят размер самого облака и вследствие этого взаимодействием их между собой можно пренебречь.

Вероятность столкновения частиц пропорциональна площади их сечения (l_i^2), их числу (n_i) и скорости их движения (v).

На долю каждой фракции приходится масса 10^{28} г, при плотности 1 г/см^3 это 10^{28} см^3 .

Суммарная площадь сечения частиц размером $l_0 = 10^4$ см:

$$l_0^2 n_0 = \frac{10^{28}}{10^4} = 10^{24} \text{ см}^2$$

Аналогично вычисляя, для наиболее крупных частиц получим:

$$l_{\max}^2 n_{\max} = \frac{10^{28}}{10^6} = 10^{22} \text{ см}^2.$$

Следовательно, в результате столкновения частиц пространство будет очищаться от мелких фракций, а размеры крупных тел будут увеличиваться.

Наличие пылевого облака в некотором ограниченном объеме создает гравитационное поле, которое будет втягивать в облако из окружающего пространства атомы присутствующих в нем газов. Скапливаясь в центре облака, атомарный газ под действием собственного гравитационного поля будет сжиматься и нагреваться, формируя центральное тяжелое тело. Под действием сил тяготения этого тела начнет сжиматься и пылевое облако, в котором с увеличением плотности будут интенсифицироваться процессы агрегации частиц.

Исходя из этой примитивной схемы, можно оценить время накопления массы в центральном тяжелом теле.

Если плотность атомарного газа равна $\rho = 10^{-24} \text{ г/см}^3$ и скорость втекания его в облако $v = 3 \cdot 10^2 \text{ см/с}$, то масса, равная по порядку величины массе Солнца, будет собрана за время T .

$$4\pi R_0^2 \rho v T = 10^{33};$$

$$T = \frac{10^{33}}{4\pi \cdot 10^{36} \cdot 10^{-24} \cdot 3 \cdot 10^2} \approx 0,210^{18} \text{ с} \approx 10^{10} \text{ лет}$$

На этом примере видно, как пылевые облака, стабильные сами по себе в собственном гравитационном поле, могут инициировать активный эволюционный процесс, формируя газообразное тяжелое тело в центре занимаемого ими пространства.

Дальнейшая эволюция самого облака определяется гравитационным полем тяжелого тела в центре, которое по мере разогрева превращается в звезду. Очищение пространства от мелких тел и сосредоточение момента количества движения в крупных телах приводит к смене механизма его перераспределения в образующейся планетарной системе. На первый план выдвигаются приливные силы, которые связывают эволюцию движения тел в космосе с формированием их внутренних структур.

Глава I. Вечное движение.

Все материальные тела в окружающем нас пространстве находятся в непрерывном движении: от галактик до атома. Небесные тела, связанные силами тяготения, обладают огромными запасами кинетической энергии, которая увеличивается при сближении тел. Энергия орбитального движения Земли равна $\sim 3 \cdot 10^{40}$ эрг, а вращения $\sim 3 \cdot 10^{36}$ эрг.

Для сравнения напомним, что энергия землетрясений за 1 год в среднем составляет $\sim 10^{25}$ эрг.

Находясь на поверхности Земли, наблюдатель не ощущает этого движения. Медленное перемещение по небосводу Солнца и звезд в нашем сознании не связывается с тем фактом, что окружная скорость вращения порядка 1000 км/час, а орбитальная ~ 30 км/с.

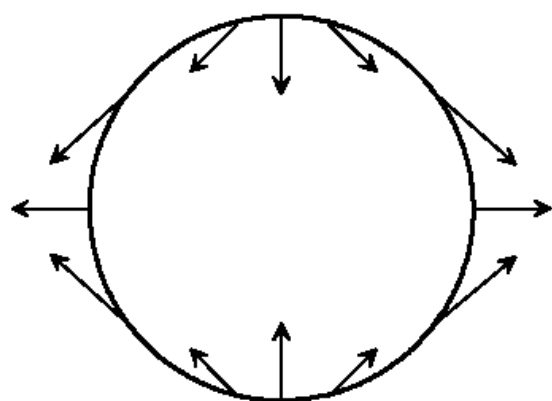
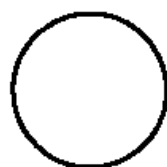
Чтобы стронуть массивное тело с места и придать ему ускорение, нужно приложить силу, достаточную для преодоления сцепления, трения, инерции. Понимание этого благодаря инженерной практике и повседневному опыту прочно вошло в наше сознание.

На поверхности Земли и в ее недрах перемещение больших масс жидкой и твердой среды осуществляется без видимых усилий за счет кинетической энергии планеты и ее гравитационного потенциала. Объемные силы инерции и гравитации действуют на каждую частицу, обладающую массой, одинаково, независимо от ее положения и связей с другими частицами внутри тела. Однако свобода перемещения отдельной частицы очень часто ограничена присутствием соседних частиц. Если рассматривать движение тела конечного размера как целого, то сумма действующих на тело сил уравновешена в центре массы силой инерции. Для частей тела, удаленных от центра масс, такое равновесие отсутствует, и сохранение формы тела обеспечивается внутренними напряжениями.

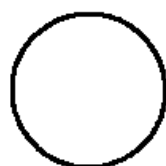
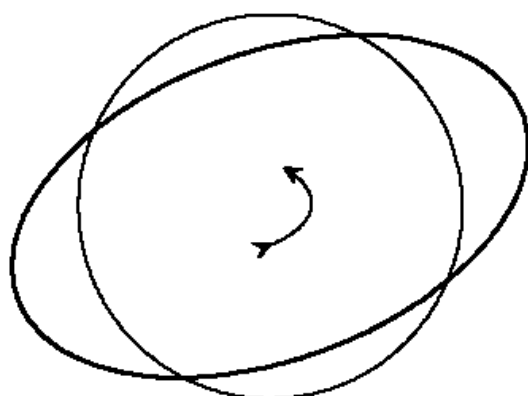
Так, например, при движении Земли и Луны вокруг общего центра масс, силы, создаваемые гравитационным полем Луны, уравновешены в центре Земли центробежной силой. Во всех остальных точках нашей планеты действуют силы, которые стремятся изменить форму Земли. Если бы Земля вращалась вокруг собственной оси так, чтобы она была обращена к Луне одной стороной, то рано или поздно произошло бы такое перераспределение масс внутри нее и такое изменение ее формы, которые позволили бы уравновесить силы лунного притяжения силами собственного гравитационного поля. Земля оказалась бы несколько вытянутой вдоль линии, соединяющей центры Луны и Земли. На рис.3 показано стрелками действие неуравновешенных сил притяжения Луны на поверхности Земли.

Под действием этих сил Земля вынуждена деформироваться, но статическое равновесие при этом не достигается, так как вследствие ее вращения силовое поле непрерывно перемещается. В результате на поверхности Земли наблюдаются бегущие приливные волны. Регулярные изменения уровня моря вблизи берегов были замечены еще в древнем мире. Приливное движение регистрируется приборами и в земной коре и в атмосфере.

Рис.3.

Земля**Луна**

Действие приливных сил на поверхности Земли



Угловая скорость вращения Земли больше угловой скорости движения Луны. Приливная волна бежит против направления вращения Земли и тормозит её, а Луну ускоряет.

Движение масс в приливной волне, хотя и вызвано действием сил, которые могут быть заранее предсказаны с достаточной точностью, очень трудно рассчитать, т.к. неизвестно, какие ограничения накладывает структура земной коры на возможные перемещения масс. Более того, можно полагать, что сами структуры возникли под воздействием приливных волн.

Одно несомненно, что максимальная амплитуда смещений в приливной волне в любой оболочке Земли будет следовать за максимумом силового поля с некоторой задержкой. Таким образом, горбы волн на лицевой и тыльной стороне будут смещены относительно линии, соединяющей центры масс Земли и Луны.

Возникшее искажение формы Земли в поле тяжести Луны позволяет Земле передавать часть своего момента количества движения Луне. При этом вращение Земли несколько замедляется, а Луна постепенно удаляется от Земли.

Деформационные процессы и движение, вызванные приливной волной, потребляют кинетическую энергию осевого вращения Земли в количестве 10^{27} эрг/год. Потребляемая энергия растекается по многим руслам. Это и формирование геологических структур в земной коре и океанических течений и вихревых образований в атмосфере. Запасы кинетической энергии, учитывая существующий уровень потребления, практически неисчерпаемы. Постоянство потока энергии подразумевает существование стационарных структур-потребителей энергии.

Ведущую роль в формировании геосфер (ядро, мантия, литосфера, гидросфера, атмосфера) играет процесс дифференциации вещества разной плотности в собственном гравитационном поле Земли. При средней плотности вещества $\rho = 5,5 \text{ г/см}^3$ различие в плотности горных пород на поверхности Земли ($\rho = 2,5 \div 3,0 \text{ г/см}^3$) и металлического ядра ($\rho \approx 12 \text{ г/см}^3$) велико и свидетельствует о мощном потоке механической энергии, который обеспечивался дифференциацией вещества на протяжении всей жизни Земли. Оценки показывают, что его величина достигает $\sim 5 \cdot 10^{28}$ эрг/год, т.е. совпадает с современными оценками теплового потока на поверхности Земли.

Итак, механическое движение планеты обладает огромной энергией. Эта энергия созидает структуры разного масштаба и распределяется ими по всему объему по многочисленным руслам.

Механическое движение в Земле изначально. Главными вопросами в геомеханике являются: Почему движение на каждом масштабном уровне реализуется в некотором устойчивом виде? Почему эти квазистационарные движения эволюционируют? Каковы механизмы распределения механической энергии, обеспечивающие взаимосвязь динамических структур? Представляется, что только путем обсуждения этих вопросов приобретается знание, необходимое для решения экологических проблем.

Может показаться, что структуры твердотельных оболочек Земли статичны и не могут находиться в гармонии с этим всеобщим движением. Действительно, свойства твердого тела, зафиксированные в модели Гука, не позволяют описать течение горных масс. Но это лишь заставляет нас обратиться к моделям со структурой, которые раскрывают более полно механические свойства твердых тел.

Глава II. Структуры твердого тела

1. Динамическая структура реального упругого тела.

В идеальном упругом теле изменению формы тела препятствуют внутренние напряжения, которые линейно возрастают с деформацией. Деформационный процесс прекращается как только внутренние напряжения полностью уравновесят действие внешних сил. Идеальное упругое тело очень прочно и не может разрушаться. В нем отсутствует механизм поглощения механической энергии, так что возбужденные колебания не затухают.

В реальных упругих телах все указанные признаки, строго говоря, отсутствуют. Неидеальность тел связана с дефектами атомной структуры кристаллов (дислокации и трещины). Этим объясняется низкий предел прочности, пластическое течение, локальные нарушения сплошности, поглощение энергии макроколебаний. Кристаллическая решетка на уровне колебаний атомов способна поглощать большое количество механической энергии макродвижения, не внося при этом существенных изменений в механические свойства твердых тел.

Необходимость учета структурных параметров твердого тела уже давно стала очевидной. Были введены всевозможные поправки и ограничения на применение модели идеального твердого тела: предел упругости, показатели поглощения упругих колебаний, предел прочности при статических и динамических нагрузках и т.п. Такой путь согласования модели и реального тела для машиностроения оказался достаточно эффективным, т.к. все конструкции работают, не выходя за пределы малых, упругих деформаций. Если же обратиться к горным породам и массивам, то легко в них обнаружить множество самых разнообразных дефектов и неоднородностей. Изучению и классификации структурных особенностей массивов горных пород посвящено много исследований.

Разнообразие и разномасштабность структур, казалось, обрекают на неудачу всякую попытку найти их обобщенный образ, не перегруженный обилием эмпирических сведений. Преодолению этой трудности способствовало то, что при однородной деформации с постоянной скоростью только небольшая часть дефектов твердого тела принимает в процессе активное участие, остальные вообще никак себя не проявляют и, следовательно, не могут повлиять на механические свойства твердого тела. Разумеется, при изменении скорости и вида деформации изменяется и структура механически значимых неоднородностей. Потребовалось разработать процедуру определения параметров механически значимых структур в реальных твердых телах и научиться моделировать эти структуры.

Развивая феноменологически идею дефектности кристаллической решетки, удалось построить модель твердого тела, которая в общих чертах учитывала структурные особенности реальных твердых тел.

Разъясним основные положения модели. В изотропное упругое тело Гука внедрены сферической формы неоднородности разного размера.

Неоднородности каждого размера распределены в объеме тела равномерно, но не обязательно регулярно. Распределение неоднородностей по размеру выбрано таким, чтобы тела разной величины имели подобную структуру:

$$\frac{l^3 dn}{d \ln l} = \alpha$$

l - размер неоднородностей;

n - число неоднородностей размера l в единице объема;

α - константа, характеризующая дефектность твердого тела.

Формула утверждает, что в теле суммарные объемы неоднородностей каждого размера одинаковы и занимают малую долю пространства, которая обозначена буквой α .

Иногда удобно пользоваться неоднородностями, размеры которых представляют дискретный ряд, например:

$$\frac{l_{i+1}}{l_1} = 2^i$$

В этом случае формула распределения неоднородностей по размеру приобретает вид: $l_i^3 n_i = \alpha$, где i пробегает все значения числового ряда (положительные и отрицательные). Читателя не должно смущать то, что общий объем всех неоднородностей может превосходить объем тела, т.к. мелкие неоднородности входят в объем крупных и сопоставление с объемом тела не имеет смысла.

Какими же механическими свойствами следует наделить эти включения в упругое тело, которые были обозначены как неоднородности? Чтобы контрастировать с упругим телом, "неоднородности" должны допускать необратимое изменение формы при любых сколь угодно малых напряжениях. С другой стороны, эта способность неоднородностей должна регулироваться деформационным процессом в твердом теле вплоть до восстановления у "неоднородности" упругих свойств. Такое механическое поведение неоднородности можно воспроизвести, если в объеме неоднородности, которая деформируется как все твердое тело, возникают избыточные напряжения сдвига (объем неоднородности при деформировании остается неизменным) и эти сдвиговые напряжения ослабевают (релаксируют) сами собой со временем. На уровне кристаллической решетки подобные явления в окрестности дефекта могут быть физически обоснованы, в нашей модели они постулируются для всех масштабных уровней.

Поскольку релаксация напряжений протекает во времени, регулирующим параметром удобно выбрать скорость деформации ($\dot{\epsilon}$).

Конкуренция двух процессов: концентрации избыточных напряжений и релаксации их при заданной скорости деформации тела определяет напряжения на неоднородностях и позволяет выявить структуру, значимую для характеристики механических свойств твердого тела. Соответствующее уравнение имеет вид:

$$\frac{d\Delta\sigma_l}{dt} = \rho c_l^2 \dot{\epsilon} - \nu \frac{\Delta\sigma_l}{l};$$

$\Delta\sigma_l$ - избыточное напряжение на неоднородности размера l ;

$\rho c_t^2 = \mu$ - произведение плотности тела на скорость поперечных волн в нем, равное по определению модулю сдвига;

$\dot{\epsilon}$ - скорость сдвиговых деформаций в твердом теле;

ν - скорость релаксации напряжения, величина которой для всех горных пород принята одинаковой $\nu = 2 \cdot 10^{-6}$ см/с.

Проинтегрировав уравнение при постоянной скорости деформации, получим значения напряжений на неоднородностях разного размера:

$$\Delta\sigma_l = \rho c_t^2 \dot{\epsilon} \frac{l}{\nu} [1 - e^{-\nu t/l}].$$

Разумеется, деформирование с постоянной скоростью происходит в течение ограниченного времени, пока не достигнут предел упругости тела. Деформации природных крупномасштабных тел имеют небольшую скорость $\sim 10^{-5} \div 10^{-7}$ 1/год, так что интервал времени, в течение которого скорость может быть постоянной, колеблется в пределах 100 - 10000 лет. Практически нам никогда не известно, когда начался тот деформационный процесс, которым охвачен в настоящий момент интересующий нас массив. Выбрав произвольно время t , определим некоторое значение $l^* = \nu t$, которое разделяет все неоднородности на две группы:

для $l < l^*$

$$\Delta\sigma_l = \rho c_t^2 \dot{\epsilon} \frac{l}{\nu}$$

Напряжения на мелких неоднородностях вследствие непрерывной релаксации остаются на одном уровне: чем больше неоднородность, тем выше напряжения.

Для $l > l^*$

$$\Delta\sigma_l = \rho c_t^2 \dot{\epsilon} \frac{l}{\nu} [1 - (1 - \frac{\nu t}{l})] = \rho c_t^2 \dot{\epsilon} t.$$

Напряжения на крупных неоднородностях не успевают релаксировать и растут со временем так же, как и во всем теле.

Отсюда следует, что структура механически значимых неоднородностей со временем меняется: определяющий размер неоднородностей $l^* = \nu t$. На мелких ($l \ll l^*$) нет напряжений, а на больших ($l > l^*$) нет релаксации.

В идеально упругом теле напряжения однозначно связаны с деформацией. Среди определяющих параметров нет характеристических величин с размерностью длины и поэтому напряженно-деформационное состояние геометрически подобных тел одинаково. В реальных телах со структурой подобие будет иметь место только в том случае, если подобны динамические структуры. Напомним, что иерархия неоднородностей в твердом теле в соответствии с принятой формулой их распределения по размерам обеспечивает геометрическое подобие тел разного размера.

Что касается динамической структуры напряженных неоднородностей, то она зависит от скорости деформации (размерность $[\dot{\epsilon}] = \text{с}^{-1}$). Учитывая, что среди параметров, характеризующих механические свойства тела, появилась

скорость релаксации $v = 2 \cdot 10^{-6}$ см/с, условием геометрического подобия структур в подобных телах является:

$$\frac{L\dot{\epsilon}}{v} = \text{const}; L - \text{размер тела.}$$

Итак, подобие механического состояния двух тел разной величины (L) будет иметь место, если сами тела геометрически подобны, скорости деформации в них обратно пропорциональны их размерам ($\dot{\epsilon}_I/\dot{\epsilon}_{II} = L_{II}/L_I$) и моменты времени от начала деформационного процесса в них пропорциональны их размерам ($t_I/t_{II} = L_I/L_{II}$).

Обратим внимание еще на один безразмерный параметр α , который равен суммарному объему неоднородностей одного размера, отнесенному к объему тела. Если ввести объем упругого тела, приходящийся на одну неоднородность заданного размера, то он определится соотношением: $a_i^3 = l_i^3/\alpha$, где a_i - расстояния между неоднородностями. Расстояния между неоднородностями (l^*) соответственно будут равны $a^* = l^*/\alpha^{1/3}$. Имеет смысл сопоставить размеры тела L и a^* .

В телах относительно небольшого размера, деформируемых с малой скоростью ($\dot{\epsilon} = \text{const}$), растущее со временем $a^*(t)$ может превысить размеры тела L . Это значит, что на всех неоднородностях прекратился рост напряжений и роль динамической структуры в дальнейшем деформационном процессе будет малозаметной.

К этому нужно только добавить, что избыточные напряжения на неоднородностях будут сохраняться не только в течение всего процесса деформирования, но и после его окончания, хотя и будут постепенно уменьшаться. Особо надо подчеркнуть, что эти напряжения не исчезнут сразу даже тогда, когда упругое тело будет полностью освобождено от нагрузки.

Иерархия разномасштабных неоднородностей обнаруживает себя в механических свойствах твердых тел, которые выглядят парадоксальными.

Затухание упругих волн можно характеризовать отношением амплитуд на концах отрезка пути, равного длине волны λ . Обычно затухание описывается экспонентой:

$$A = A_0 \exp(-\gamma x) f(x - c/t); c - \text{скорость упругих волн.}$$

Логарифм отношения амплитуд на отрезке пути λ называют логарифмическим декрементом δ :

$$\delta = \lg \frac{A}{A_0} = \gamma \lambda = \gamma \frac{c}{A}$$

Энергия волны пропорциональна квадрату амплитуды, так что потеря энергии волной на отрезке $x = \lambda$:

$$\frac{\Delta E}{E} = 2\sigma = 2\gamma \frac{c}{A} = \frac{2\pi}{Q}$$

Q называют добротностью материала; в дальнейшем она будет использоваться для характеристики горных пород.

Экспериментально установлено поразительное свойство горных пород: декремент затухания (или добротность) в них не зависит от частоты колебаний. Это значит, что поглощение энергии при распространении упругих волн разной длины будет одинаковым на пути, пропорциональном длине волны. В рамках континуальной модели твердого тела, бездефектной и с дефектами одного размера, объяснить это свойство не представляется возможным. Дело обстоит так, словно упругие волны разной длины "выбирают" для себя подходящую по масштабу структуру в твердом теле и только с ней и взаимодействуют.

Рассмотренные выше динамические структуры, возникающие при деформировании твердого тела с неоднородностями, объясняют это свойство горных пород. Проведя соответствующие математические операции, которые здесь опустим, можно поставить в соответствие принятые выше параметры модели твердого тела с неоднородностями и эмпирический коэффициент добротности Q . Оказалось, что добротность однозначно определяется суммарным объемом неоднородностей одного размера (α):

$$\frac{l^3 dn}{d \ln l} = \alpha = \frac{2}{\pi \cdot Q}$$

Таким образом, трудная задача выявления распределения механически значимых неоднородностей в реальных телах получила разрешение в простой, давно известной процедуре определения добротности Q материала.

Уместно здесь сказать о различии масштабов структур, которые ответственны за поглощение энергии упругих волн и за рассеяние упругих волн. Наиболее эффективно рассеяние волн происходит на неоднородностях, размеры которых соизмеримы с длиной волны. Что касается неоднородностей, на которых происходит диссипация механической энергии, то их размеры l должны быть порядка $l^* = vT = v \frac{\lambda}{c}$, т.е. примерно в 10^{11} раз меньше. Так, например, упругая волна длиной ~ 500 м ($f=10$ Гц) будет диссипировать свою энергию на неоднородностях $l^* \sim 10^{-6}$ см.

Отсюда следует, что сейсмические колебания, имеющие быть повсюду и постоянно, способны активизировать процессы в горных породах на микроуровне.

2. Структура разрушения твердого тела.

Разрушение, которое имеет место в объеме твердого тела при его однородной деформации, характеризуется средним размером куса (блока, отдельности) и гранулометрическим составом, т.е. распределением кусков по размеру. Образование множества разноразмерных кусков в объеме твердого тела, когда деформация в каждой точке одинакова, представляется довольно сложным процессом. Можно предложить по крайней мере два варианта его реализации.

При медленном развитии случайно возникшие единичные трещины образуют внутри тела крупные блоки, которые при нарастании деформации дробятся на более мелкие. В этом случае энергия, потребная для разрушения, должна непрерывно поступать в деформируемый объем извне.

При быстром деформировании, учитывая, что разрушение определяется скоростью прорастания трещин, которая меньше скорости распространения

продольных волн в упругом теле, можно создать в объеме тела запас упругой энергии, достаточный для дробления его на мелкие куски. В этом случае в твердом теле образуется множество зародышей трещин, которые при прорастании, случайно пересекаясь, одновременно формируют куски разного размера. Поступлением механической энергии в этот период извне можно пренебречь. Естественно ожидать, что каждый из вариантов разрушения будет отличаться своим гранулометрическим составом кусков.

Как показали эксперименты, действительно, последовательное дробление кусков в шаровых мельницах (горная порода во вращающихся барабанах дробится металлическими шарами) дает логнормальное распределение кусков по крупности, а дробление во взрывной волне - распределение Вейбулла.

Средний размер куска по обоим вариантам разрушения зависит от затраченной энергии на дробление в единице объема тела: чем она больше, тем мельче средний размер куска. Попытки установить количественные соотношения, исходя из представлений о тождественности энергии дробления и энергии образования новой поверхности, оказались безуспешными как вследствие методических трудностей оценки общей поверхности образованных мелких частиц, так и вследствие неопределенности самой величины поверхностной энергии реальных тел.

Неоднородности в природных телах оказывают первостепенное влияние на размер образующихся при дроблении кусков, и поэтому зависимость среднего по размеру куска от энергии, затраченной на дробление, следует искать в изменении динамической структуры напряженного состояния деформируемого тела. Эти изменения обусловлены скоростью деформации, или, другими словами, количеством механической энергии, получаемой телом в единицу времени. Как уже было сказано в предыдущем параграфе, напряжения на неоднородностях первоначально растут с деформацией, а потом останавливаются на величине, которая пропорциональна размеру неоднородности

$$\Delta\sigma_l = \rho c_t^2 \dot{\epsilon} \frac{l}{v}$$

На всех неоднородностях, где $\Delta\sigma_l$ превысит прочностной предел σ^* , возникнут зародыши трещин, дальнейшее развитие которых будет определяться запасом упругой энергии в объеме разрушаемого тела. Обозначим размер наименьшей из таких неоднородностей l_0 :

$$\sigma^* = \rho c_t^2 \dot{\epsilon} \frac{l_0}{v}.$$

Расстояние между зародышами трещин в твердом теле (L_0) будет определять минимальный размер куска, а, следовательно, и средний размер, так как распределение по крупности полагаем известным. Напомним, что L_0 и l_0 связаны между собой формулой:

$$\frac{L_0^3}{l_0^3} = \frac{\pi Q}{2}, \text{ где } Q - \text{добротность.}$$

Как показали экспериментальные исследования гранулометрического состава, при однократном дроблении твердого тела, распределение частиц по

крупности может быть представлено в виде, имеющем простое и наглядное толкование:

$$L_i^3 N_i = L_0^3 N_0; L_i = i L_0.$$

Все фракции частиц, размеры которых кратны L_0 , занимают одинаковый объем. Имеет место нечто похожее на закон равномерного распределения энергии по степеням свободы: энергия разрушения равномерно распределяется между фракциями.

Само распределение по крупности качественно отличается от распределения неоднородностей в неразрушенном твердом теле, так как появилась характеристическая длина L_0 , которая явилась масштабом для измерения кусков.

Число фракций определяется вероятностью образования куска наименьшего размера (L_0). Расположение трещин на соседних неоднородностях (l_0) очень редко случается таким, чтобы они при пересечении выделили бы отдельность (L_0^3). Оценки показали, что эта вероятность порядка 0,01. В дальнейшем для определенности будет использоваться вероятность, равная $1/3^4$. Таким образом, вся раздробленная масса укладывается равномерно в $(3^4) = 81$ фракционный интервал шириной L_0 . Максимальный размер куска $L_{max} = 81 L_0$ и, соответственно, средний размер гранулометрического состава

$$\frac{L_{max} + L_0}{2} \approx 40 L_0.$$

Чрезвычайно широкий спектр образующихся при дроблении частиц требует для получения достоверных параметров распределения больших объемов исследуемых твердых тел. Так, полный спектр частиц, включая хотя бы один кусок максимального размера, имеет суммарный объем $V_0 = 81 L_0^3 = 0,4 \cdot 10^8 L_0^3$. Поэтому исходный размер исследуемого тела должен превосходить минимальный размер куска почти в тысячу раз:

$$\sqrt[3]{V_0} \geq 350 L_0.$$

С этим связаны ограниченные возможности типовых испытаний для исследования зависимости гранулометрического состава от масштаба и скорости деформирования. Экспериментальные данные о грансоставе в произвольно ограниченном диапазоне (например, размерами образца) не только искажает масштаб (L_0), но и характер распределения кусков по крупности.

Во всех случаях, когда требуется сопоставить эффекты разрушения твердого тела, нарушений сплошности и связанных с ними показателей на разных масштабных уровнях, необходимо помнить, что механическое подобие включает не только геометрию тела, но и его динамические структуры.

Иерархическая структура блочного строения природных тел придает им новые качества: не только облегчает деформирование под действием объемных сил, но и фиксирует направление происшедших подвижек. Эта механическая память может выполнять роль инерции при медленном движении.

Повсеместное распространение блочного строения горных массивов и большое число "живых" разломов земной коры свидетельствуют о том, что динамические структуры являются формой самоорганизации движения в твердотельных оболочках Земли.

Подвижность твердых тел блочного строения обусловлена тем, что деформация складывается из перемещения блоков друг относительно друга и

деформации самих блоков. В телах блочного строения при деформировании возникают цепочки блоков, несущих нагрузку, создающих внутри тела каркас, который сопротивляется изменению формы тела. Другая часть блоков остается слабонапряженной или вовсе свободной от нагрузки. Перестройка каркасной структуры сопровождается динамическими процессами, возбуждающими упругие колебания во всем теле.

Свободные блоки, обладая подвижностью, могут перемещаться внутри блочной структуры под воздействием бегущих по телу упругих волн. Эти перемещения, будучи не связанными с деформацией всего тела, подготавливают перестройку каркасной структуры - перераспределение нагрузки между блоками. В некотором смысле их роль в деформационном процессе подобна роли дислокаций при деформировании кристаллической решетки.

3. Медленное движение в твердых телах.

Многие материалы обладают пластичностью, легко деформируются без нарушения сплошности. Обычно пластическое течение имеет место, когда материал сжат внешним давлением, препятствующим образованию трещин. Как правило, пластичность материала интересует механика, если напряжения в твердом теле превышают предел упругости. Но известно, что пластическое течение может наблюдаться и при низких напряжениях в твердом теле в случае очень длительных нагрузок.

Такое поведение твердых тел - проявление его динамической структуры. При деформации твердого тела с постоянной скоростью на неоднородностях небольшого размера устанавливается постоянное избыточное напряжение, пропорциональное скорости деформации и линейному размеру неоднородности.

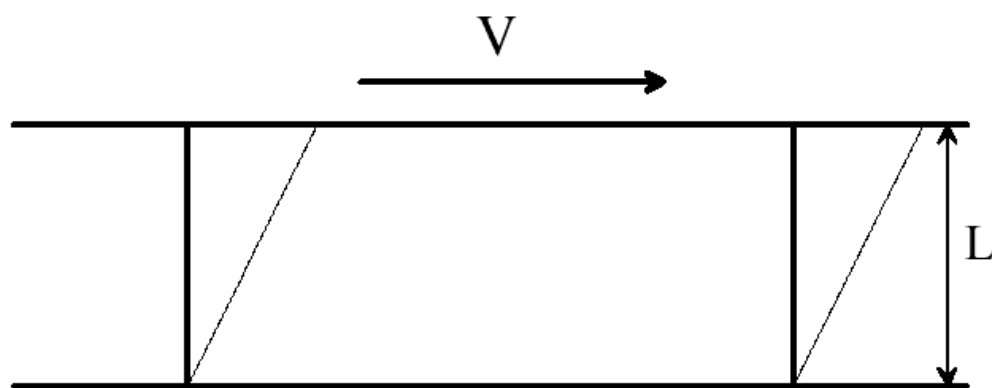
Если тело имеет конечные размеры, то со временем на всех неоднородностях прекратится рост напряжений, вследствие их релаксации. В большом, но ограниченном теле размеры неоднородности так же ограничены, и поэтому, снижая скорость деформации, величину избыточных напряжений можно сделать сколь угодно малой. С точки зрения баланса сил внутренних и внешних напряженными неоднородностями при медленном деформировании, казалось бы, можно пренебречь, но посмотрим на сложившуюся ситуацию с других позиций. В большом теле суммарный объем неоднородностей всех размеров может превзойти собственный объем тела. Разумеется, простое сложение объемов неоднородностей разного размера дает лишь оценку. Отсутствие избыточных напряжений является следствием процесса релаксации в объеме неоднородности. Эти неоднородности представляют собой как бы "жидкие" включения в твердое тело. Пока их мало, твердое тело сохраняет свои исходные свойства, но по достижении определенной концентрации этих включений они могут объединяться и разъединить твердые блоки "жидкими" прослойками. Естественно, механические свойства тела качественно изменятся. Нечто похожее можно наблюдать, когда жидкость, насыщенная газом, вскипает при быстром снижении давления: жидкость с пузырьками газа превращается в газ с капельками жидкости - это совершенно разные структуры.

Итак, при медленном деформировании большого тела с низкой добротностью по мере насыщения его неоднородностями с постоянным напряжением происходит трансформация динамической структуры: противодействие изменению формы тела теперь обеспечивается напряжениями на

неоднородностях, а упругими напряжениями можно пренебречь. Так истолковывается ползучесть (крип) в рамках модели твердого тела со структурой. В неограниченной твердой среде при любой скорости деформации всегда найдется достаточно большая неоднородность, на которой напряжения будут нарастать вплоть до разрушающих, так что необратимые деформации без нарушения сплошности в неограниченной среде невозможны.

До сих пор в рассуждениях о динамической структуре при медленном деформировании твердых тел количественные критерии возникновения (или существования) режима крипа (ползучести) отсутствовали.

Рис.4.



Рассмотрим простейший случай искажения формы тела при сдвиге, как это показано на рис.4. Два берега полосы смещаются друг относительно друга со скоростью V . Скорость деформации внутри полосы шириной L равна $\dot{\epsilon} = V/L$. Напряжение на неоднородностях

$$\Delta\sigma_l = \rho c_t^2 \dot{\epsilon} \frac{l}{v} = \rho c_t^2 \frac{V l}{v L}; \quad v = 2 \cdot 10^{-6} \text{ см/с.}$$

Режим крипа возможен, если $\Delta\sigma_l \ll \sigma^*$. Учитывая, что прочностные характеристики горных пород не превышают обычно $10^{-3} \rho c_t^2$, получим:

$$\frac{\Delta\sigma_l}{\rho c_t^2} = \frac{V l}{v L} \ll 10^{-3}, \text{ или } V \ll 10^{-3} v \frac{L}{l}.$$

Если принять расстояния между неоднородностями наиболее крупными порядка ширины полосы L , то отношение: $\frac{L}{l} = \left(\frac{\pi \cdot Q}{2}\right)^{1/3}$ является постоянной величиной. Отсюда следует:

$$V < 10^{-3} v \left(\frac{\pi \cdot Q}{2}\right)^{1/3}.$$

Таким образом, режим крипа (ползучести) возможен, если скорость смещения по берегам полосы не превышает некоторой критической величины V^* ,

которая зависит от добротности материала. При $Q=100$ $V^*=0,3$ см.год. Теперь же обратим внимание на то, что критерий, нами введенный, не содержит размера деформируемого тела. Поэтому механика тел, деформируемых в режиме крипа, является механикой медленных движений, а не медленных деформаций. Два подобных тела, испытывающих подобную деформацию, но разного размера, будут иметь подобную динамическую структуру, если скорости смещения их границ будут одинаковы. При этом скорости деформаций в меньшем теле будут больше в отношении размеров тел, а неоднородности с одинаковыми напряжениями будут иметь размеры, пропорциональные размеру тел.

При таком подобии структур и неупругие напряжения в деформируемой полосе будут одинаковы. Это, в свою очередь, означает, что энергозатраты на перемещение тел, разделенных такой полосой, не зависят от ширины полосы (L).

Такое безразличие к ширине пограничных зон при медленном движении твердых тел качественно отличает это течение от течения вязкой жидкости, где напряжения сдвига зависят от градиента скорости (V/L). Напомним, что в жидкости и газе вязкие силы связаны с переносом количества движения из одного слоя в другой. В твердом теле неупругие напряжения обусловлены релаксацией напряжений на неоднородностях. Похожесть крипа и вязкого течения жидкости возникает на принципиально разных механизмах диссипации механической энергии.

Вечное движение, которым охвачены все материальные тела от галактик до атома, поддерживается потоком механической энергии от крупных тел, обладающих огромным гравитационным потенциалом к менее крупным, далее к малым и все более мелким. В этом состоит назначение динамических структур в геосферах, включая твердотельные оболочки.

Глава III. Проблемы и решения

1. Парадоксы разрушения твердого тела.

Рассмотрим структуры напряжений в твердом теле, которые возникают при нагружении и разгрузке цилиндрической колонны.

Выпишем уравнение для избыточных напряжений на неоднородностях в тензорном представлении:

$$\frac{d\Delta\sigma_{ik}^l}{dt} = \rho c_t^2 (\dot{u}_{ik} - \frac{1}{3}\dot{u}_{ll}\delta_{ik}) - v \frac{\Delta\sigma_{ik}^l}{l}$$

i, k - обозначение осей (x, y, z); $(u_{ik} - \frac{1}{3}u_{ll}\delta_{ik})$ - деформация сдвига;

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{при } i=k \\ 0 & \text{при } i \neq k \end{cases}$$

$\dot{u}_{ik}$ - скорость деформации. Избыточное напряжение, приводящее к изменению объема, на неоднородностях отсутствует:

$$\Delta\sigma_{ll} = \Delta\sigma_{xx} + \Delta\sigma_{yy} + \Delta\sigma_{zz} = 0$$

Доля объема тела, занимаемая неоднородностями одного размера (l), определяется добротностью материала:

$$\frac{l^3 dn}{d \ln l} = \frac{2}{\pi Q}, \quad n - \text{число неоднородностей в единице объема.}$$

Средние неупругие напряжения в твердом теле определяются суммированием напряжений на неоднородностях с учетом доли площади, которую они занимают:

$$\sigma_{ik}^l = \frac{2}{\pi Q} \int_l \sigma_{ik}^l d \ln l$$

Пусть нагружение колонны во времени задано:

$$P(t) = \begin{cases} P_T^l, & 0 < t < T \\ P & t > T \end{cases}$$

Деформация колонны (ось Z - вертикальна) неоднозначно связана с величиной нагрузки (P):

$$u_{zz} = \frac{P}{\pi a^2 E} - \frac{\sigma_{zz}^l}{E}$$

Здесь E - модуль Юнга, πa^2 - площадь сечения колонны; сжимающие силы (P, σ_{zz}) как и деформация сжатия - отрицательные величины.

Неупругие напряжения σ_{zz}^l зависят от скорости деформации, которую нужно найти из решения задачи. Учитывая, что неупругие напряжения много меньше упругих, можно воспользоваться методом последовательного приближения:

$$u_{zz} \approx \frac{P(t)}{\pi a^2 E} = \frac{P}{\pi a^2 E} \frac{t}{T}$$

$$\dot{u}_{zz} \approx \frac{P}{\pi a^2 E} \cdot \frac{1}{T} \text{ в интервале } 0 \leq t \leq T$$

Упругие деформации: $u_{xx} = u_{yy} = -\sigma u_{zz}$; σ - коэффициент Пуассона.

Объемная деформация: $u_{ll} = u_{xx} + u_{yy} + u_{zz} = (1 - 2\sigma)u_{zz}$

Сдвиговая деформация: $(u_{zz} - \frac{1}{3} u_{ll}) = \frac{2}{3} (1 + \sigma)u_{zz}$

Подставим в уравнение для напряжений на неоднородностях скорость сдвиговых деформаций $\frac{2}{3}(1 + \sigma)\dot{u}_{zz}$, а также заменим

$\rho c_t^2 = \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}$. В результате получим:

$$\frac{d\Delta\sigma_{zz}^l}{dt} = \frac{E}{3}\dot{u}_{zz} - v\frac{\Delta\sigma_{zz}^l}{l}$$

Интегрируя по времени в интервале $0 < t < T$, когда $\dot{u}_{zz} = \frac{P}{\pi a^2 E} \frac{1}{T}$, найдем:

$$\Delta\sigma_{zz}^l = \frac{P}{3\pi a^2} \frac{l}{v \cdot T} [1 - e^{-vt/l}]$$

Другие компоненты тензора:

$$\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{yy} = -\frac{1}{2}\Delta\sigma_{zz}$$

Отметим, что напряжения, направленные по нормали к боковой поверхности колонны имеют другой знак: если σ_{zz} - сжимающее напряжение, то $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ - растягивающие.

Упрощенно зависимость $\Delta\sigma_{zz}^l(T, l)$ в момент времени $t=T$ можно представить так:

$$\Delta\sigma_{zz}^l \approx \frac{1}{3} \frac{P}{\pi a^2} \frac{l}{v \cdot T} \text{ для } \frac{l}{v \cdot T} < 1$$

$$\Delta\sigma_{zz}^l \approx \frac{1}{3} \frac{P}{\pi a^2} \text{ для } \frac{l}{v \cdot T} > 1.$$

На крупных неоднородностях избыточные напряжения одинаковы и достигают 1/3 упругих напряжений в колонне. На мелких неоднородностях напряжения пропорциональны l , так что при интегрировании их вкладом в величину неупругих напряжений пренебрежем:

$$\sigma'_{zz} = \frac{2}{\pi \cdot Q} \int_{l=vt}^a \Delta\sigma_{zz}^l d \ln l = \frac{P}{\pi a^2} \frac{2}{3\pi Q} \ln \frac{a}{v \cdot T}$$

Подставим величины, которые могут встретиться в практике: $a = 100\text{см}$, $T = 10^5\text{сек}$, $Q = 10^2$:

$$\sigma'_{zz} = \frac{P}{\pi a^2} \frac{2}{3\pi \cdot 10^2} \ln \frac{100}{2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5} \approx 10^{-2} \frac{P}{\pi a^2}$$

Видно, что неупругие напряжения действительно очень малы и поэтому статика, казалось бы, оправдана во всех случаях, если только можно пренебречь силами инерции. Однако, такое суждение в данном случае слишком поспешно. Дело в том, что неупругие

напряжения и после нагружения колонны продолжают меняться во времени, а значит, будет меняться и деформация колонны. Ограничиваться сопоставлением величин упругих и неупругих напряжений, игнорируя временные параметры, было бы неправильным.

При постоянной нагрузке (P) скорость деформации практически равна нулю, так что

$$\frac{d\Delta\sigma_{zz}^I}{dt} = -v \frac{\Delta\sigma_{zz}^I}{l}$$

Интегрируя по времени, ведя отсчет его от момента, когда избыточные напряжения на неоднородностях достигли $\Delta\sigma_{zz} = \frac{1}{3} \frac{P}{\pi a^2}$ и в дальнейшем будут релаксировать, получим:

$$\Delta\sigma_{zz}^I = \frac{P}{3\pi a^2} e^{-vt/l}$$

Чтобы определить неупругие напряжения, нужно проинтегрировать по всем неоднородностям. Воспользуемся упрощенным представлением подынтегральной функции.

$$\sigma'_{zz} = \frac{2}{\pi \cdot Q} \cdot \frac{P}{3\pi a^2} \int_{l^*}^a e^{-vt/l} d \ln l; l^* = v(T + t)$$

$$e^{-vt/l} \approx \begin{cases} 1; n_{pu}; vt/l < 1 \\ 0; n_{pu}; vt/l > 1 \end{cases}$$

$$\sigma'_{zz} \approx \frac{2}{\pi \cdot Q} \cdot \frac{P}{3\pi a^2} \ln \frac{a}{v(t+T)}$$

Хотя на неоднородностях каждого размера напряжения релаксируют по экспоненте, неупругое напряжение спадает медленней, по логарифмическому закону:

$$\frac{\sigma'_{zz}}{(\sigma'_{zz})_{t=0}} = \frac{\ln(a/vt)}{\ln(a/vT)} \quad (t \gg T)$$

Время, в течение которого неупругое напряжение уменьшится в два раза, как следует из последнего соотношения, будет на порядок больше времени нагружения (T). Так, в приведенном нами примере $T = 10^5$ сек (одни сутки). Значит, деформация колонны за счет релаксации неупругих напряжений будет продолжаться несколько декад. Большая длительность проявления динамической структуры может существенно изменить оценку роли неупругих напряжений, когда речь идет о временной последовательности и скорости строительства крупномасштабного сооружения.

Рассмотрим теперь структуру напряжений в колонне при разгрузке после релаксации всех напряжений на неоднородностях. Если разгрузка производится за время T по линейному закону, то напряжения на неоднородностях возникают снова, но уже с другим знаком:

$$\Delta\sigma_{zz}^I \approx -\frac{1}{3} \frac{P}{\pi a^2} \quad (\text{на неоднородностях } l > vT)$$

Напряжения на неоднородностях имеют тот же знак, что и деформация: при сжатии $u_{zz} < 0$ и $\Delta\sigma_{zz} < 0$; при растяжении $u_{zz} > 0$ и $\Delta\sigma_{zz} > 0$.

Когда колонна нагружалась, σ_{zz}^f препятствовали сжатию колонны. По мере релаксации неупругих напряжений нагрузку на себя принимали упругие силы, вследствие чего колонна продолжала сжиматься.

При разгрузке неупругие напряжения препятствуют растяжению, которое происходит в процессе восстановления исходной длины колонны упругими силами. В тот момент, когда нагрузка будет полностью снята, упругие напряжения в колонне исчезнут не полностью, т.к. они должны будут уравнивать действие растягивающих напряжений на неоднородностях.

В идеальном упругом теле при малой скорости нагружения и разгрузки, когда время нагружения или разгрузки, умноженное на скорость упругих волн, много больше линейных размеров тела, деформации строго следуют за нагрузкой, т.к. напряжения и деформации связаны между собой законом Гука. В нашем примере нагружения и разгрузки колонны $u_{zz} = \frac{P}{\pi a^2 E}$ и $u_{zz} = \frac{\sigma_{zz}}{E}$.

Если σ_{zz} не превосходит предел прочности материала на раздавливание, никаких нарушений сплошности в теле колонны не должно быть, т.к. отсутствуют растягивающие напряжения. Однако, в целиках, удерживающих кровлю подземных выработок, (аналоги рассмотренных нами колонн) наблюдаются вертикальные трещины, шелушение боковых поверхностей, что свидетельствует о наличии растягивающих напряжений.

Для однородного упругого тела такая реакция на осевую нагрузку выглядит парадоксальной, необъяснимой. Неоднородности, на которых при деформировании возникают избыточные напряжения, позволяют связать это явление с динамической структурой твердого тела.

Если при нагружении колонны напряжения на неоднородностях $\Delta\sigma_{zz}$ сжимающие, то $\Delta\sigma_{yy} = \Delta\sigma_{xx}$ - растягивающие:

$$\Delta\sigma_{xx} = -\frac{1}{2}\Delta\sigma_{zz} = -\frac{1}{2}\frac{P}{3\pi a^2} = \frac{1}{6}\sigma_{zz}$$

Хотя эти напряжения заметно меньше напряжений, уравнивающих осевую нагрузку, но они действуют в площадках, где упругие напряжения вовсе отсутствуют, а прочность горных пород на растяжение часто на порядок меньше прочности на раздавливание. Таким образом, динамическая структура играет определяющую роль в процессе зарождения трещин, рост которых приводит к разрушению твердого тела.

Еще более парадоксальным представляется разрушение твердого тела при разгрузке, когда уменьшаются сжимающие упругие напряжения в теле. Динамическая структура напряжений на неоднородностях и в этом случае объясняет появление трещин в поперечном сечении колонны при ее разгрузке: растягивающие напряжения на неоднородностях достигают одной трети сжимающих упругих напряжений и, как было показано, не исчезают тотчас с уменьшением сжимающих тело сил.

Оба парадоксальных эффекта могут быть воспроизведены в опытах по разрушению хрупких тел и результаты согласованы с оценками, вытекающими из представлений модели твердого тела.

2. Сейсмический режим и структура разрушения.

Среди многочисленных свидетельств постоянства деформационных процессов в земных недрах землетрясения занимают едва ли не первое место. В человеческом восприятии землетрясения - пугающее проявление стихии.

Систематическая работа по созданию сети приборной регистрации землетрясений и накоплению материала наблюдений за последнее столетие дала замечательные плоды. Была выявлена упорядоченность землетрясений различной энергии, которая нашла свое выражение в законе повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера. Сейсмические колебания поверхности Земли, вызванные упругими волнами, излучаемыми при землетрясениях, являются главным источником информации о внутреннем строении Земли. Однако сам очаг землетрясения остается до сих пор очень трудным для исследования объектом. Это связано с тем, что упругие волны формируются за пределами очага и поэтому могут дать лишь самые общие представления о характере движения в очаговой зоне.

По мнению Ю.В.Ризниченко, выдвинувшего идею непрерывности потока сейсмической энергии, ключевой задачей сейсморайонирования является определение максимального землетрясения, которое возможно в том или ином регионе. Закон Гутенберга-Рихтера устанавливает частоту повторения землетрясений различной энергии. Энергия землетрясения пропорциональна объему, в пределах которого накопленная энергия упругих напряжений твердого тела осуществляет быстрое изменение его формы, сопровождаемое излучением упругих волн. Переходя от энергии к объему очага (L^3), получаем очень простое выражение для закона повторяемости землетрясений:

$$L_i^3 N_i = \text{const, где } L_i = i L_0 \ (1 < i < 81);$$

N_i - число землетрясений в год.

Этот закон был установлен для Земли в целом в диапазоне энергий от 10^{18} эрг до 10^{24} эрг.

В дальнейшем подобные зависимости были установлены и для регионов. При этом интервалы энергий землетрясений нередко ограничивались чувствительностью аппаратуры. В результате из поля зрения выпадал характеристический размер очага, который можно было бы соотнести с естественным диапазоном изменения энергий землетрясений в регионе.

Пространственное распределение очагов неоднородно, и зоны сейсмической активности ограничены. В ограниченном объеме не могут произойти землетрясения, очаг которого был бы с ним соизмерим. Однако из чисто геометрических соображений можно лишь обозначить предельные значения, которые никогда не будут реализованы.

Воспользуемся тем, что закон Гутенберга-Рихтера формально совпадает с распределением кусков по крупности в структуре разрушения твердого тела. Размеры минимального и максимального кусков зависят от скорости деформации тела. Предположим, что землетрясения представляют собой акт образования блока, отделения его от окружающего массива. Только в этом случае, как при обрыве струны, может произойти быстрое изменение формы и в окружающем пространстве возникнут упругие волны. Половина запасенной в очаге упругой энергии излучится вовне, а другая половина будет "потеряна" в

затухающих колебаниях отделенного блока. Размеры очагов минимального и максимального землетрясений взаимосвязаны, как и куски в разрушаемом твердом теле: $L_{max} = 81L_{min}$.

Получение представительного ряда землетрясений в отдельном регионе возможно, если объем массива, деформируемый с постоянной скоростью, примерно на два порядка превосходит объем очага наибольшего из возможных землетрясений. В противном случае региональная повторяемость землетрясений будет искажена. Предоставим специалистам решать методические проблемы.

Теперь же проведем сопоставление сейсмических режимов при различных скоростях деформирования земной коры. Выпишем параметры и соотношения между ними в сейсмоактивной зоне:

V_0 - объем литосферы, в пределах которого скорость деформации постоянна и установился стационарный сейсмический режим;

$\dot{\epsilon}$ - скорость сдвиговой деформации;

$\Delta\sigma^*$ - предельное напряжение на неоднородностях, при достижении которого появляются трещины;

$l_0 = \frac{v \Delta\sigma^*}{\dot{\epsilon} \mu}$, ($\mu = \rho c_l^2$) - размер неоднородностей, которые участвуют в формировании структуры разрушения;

$L_0 = l_0 \left(\frac{\pi \cdot Q}{2} \right)^{1/3}$ - среднее расстояние между трещинами,

определяющее минимальный размер очага;

$E_0 = \frac{(\Delta\sigma^*)^2 l_0^3}{2\mu}$ - энергия, выделяемая при отделении блока объемом l_0^3 ; половина ее излучается в виде упругих волн и принимается за энергию землетрясения;

$N_0 = \left(\frac{L_{max}}{L_0} \right)^3 = 81^3 \approx 5 \cdot 10^5$ 1/год, если $N_{max} = 1$ 1/год.

Для определенности зафиксируем механические характеристики вещества литосферы в сейсмогенной зоне:

$$\mu = 5 \cdot 10^{11} \text{ дин/см}^2; Q = 100; \Delta\sigma^* / \mu = 2 \cdot 10^{-4}.$$

Толщину сейсмогенного слоя примем равной $H = 100 \text{ км.}$, если $(V_0)^{1/3} > 100 \text{ км.}$ Подставив эти значения в формулы, получим следующие зависимости.

Размер неоднородности $l_0 = \frac{10^{-4}}{\dot{\epsilon}}$; если $\dot{\epsilon}$ измерять в 1/год, то l_0 получим в метрах. Размер очага минимального землетрясения

$$L_0 = \left(\frac{\pi \cdot Q}{2} \right)^{1/3} \cdot l_0 \approx 5l_0.$$

Класс (K) землетрясения численно равен десятичному логарифму энергии, излучаемой упругими волнами, в джоулях.

Класс минимального землетрясения обозначим K_0 , тогда:

$$K_0 = \lg\left(\frac{5 \cdot 10^{-10}}{\dot{\epsilon}^3}\right); \quad K_i = K_0 + 3 \lg \frac{L_i}{L_0}$$

$$K_{\max} \approx K_0 + 6.$$

Весь спектр землетрясений от K_0 до $K_{\max}$ для своей реализации нуждается в объеме

$$V_0 \approx \frac{5 \cdot 10^{-12}}{\dot{\epsilon}^3}; \quad [\epsilon] = 1/\text{год}; \quad [V_0] = \text{км}^3.$$

Площадь сейсмогенной зоны:

$$S_0 = \frac{V_0}{100} \text{ для } V_0 > H^3.$$

Время нарастания напряжений на неоднородностях $\Theta = \frac{2l_0}{v}$ определяет время подготовки землетрясения - оно одинаково для всех классов землетрясений в данной сейсмогенной зоне (одинаковая скорость деформации)

$$\Theta = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{\dot{\epsilon}}.$$

Частота повторения землетрясений K_i -класса равна числу блоков N_i соответствующего размера (L_i), отнесенному к интервалу времени Θ .

В таблице приведены параметры сейсмического режима для трех значений скорости деформации $\dot{\epsilon} = 10^{-5}; 10^{-6}; 10^{-7}$, которые охватывают практически весь диапазон скоростей деформации в сейсмогенной зоне.

Таблица 1

$\dot{\epsilon}$	1/год	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
L_0 , м		50	500	5000
K_0		5,7	8,7	11,7
$L_{\max}$, км		4	40	400
$K_{\max}$		11,7	14,7	17,7
V_0 , км ³		$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^9$
S_0 , км ²		$3 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^7$
Θ , лет		30	300	3000
N_0 , 1/год		$15 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$	$0,15 \cdot 10^3$
$N_{\max}$, 1/год		$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$

Короткий комментарий. При низких скоростях деформации максимальный очаг землетрясения охватывает всю толщу литосферы. Повторяемость таких катастрофических землетрясений на уровне одного раза в 1000 лет с равной вероятностью на территории $7000 \times 7000 \text{ км}^2$. Если же оценить вероятность события такого рода на площади 10^6 км^2 , то она окажется еще в 50 раз меньше.

Практически это значит, что сейсмический режим при скорости деформирования 10^{-7} 1/год на ограниченной территории будет восприниматься как нерегулярный, а отдельные землетрясения - как непредсказуемые и случайные события.

При скоростях деформации $\dot{\epsilon} > 10^{-5}$ сейсмогенные области могут иметь размеры менее 100 км, а время подготовки землетрясений не будет превышать 10 лет. Для таких локальных сейсмогенных областей, благодаря высокой частоте событий, могут быть разработаны всевозможные эмпирические прогностические признаки, но они не представляют большого интереса, т.к. землетрясения в этих областях имеют низкий энергетический класс и не очень опасны.

Наиболее распространенные в мире землетрясения, приносящие наибольший ущерб, обусловлены деформацией значительных объемов в литосфере со скоростями $10^{-5} \div 10^{-6}$ 1/год.

Так, землетрясения $K \approx 12$ для сейсмогенной территории площадью 10^5 км^2 будут повторяться 50 раз при $\dot{\epsilon} = 10^{-5}$ 1/год и только 1,5 раза при $\dot{\epsilon} = 10^{-6}$ 1/год. Но уже землетрясения большей энергии $K \geq 13$ могут иметь место только при скоростях деформации 10^{-6} 1/год. При этом время их подготовки будет превышать 100 лет.

Если внутри большой области с малой скоростью деформации возникнет небольшой объем, деформируемый быстрее, ситуация, естественно, усложнится, и по данным о повторяемости землетрясений без учета распределения в пространстве будет трудно установить величину максимального землетрясения для региона.

Сближая представления о структуре разрушения твердого тела и представления о сейсмическом режиме, удастся выполнить ряд количественных оценок размеров сейсмогенных областей и очаговых зон, а также уточнить саму постановку задачи о максимальном землетрясении, возможном в отдельном регионе. Показана значимость данных о частоте слабых землетрясений для характеристики сейсмического режима.

3. Критерии медленного движения и дезинтеграции среды в земных недрах.

Движение горных масс вызывается действием гравитационных сил на различающиеся по плотности тела в коре и мантии, а также действием приливных волн, которые, тормозя вращение Земли вокруг своей оси, снабжают энергией деформационные процессы, главным образом, в литосфере.

Результатом этого движения является возникновение тектонических напряжений, неровностей земной поверхности и дезинтеграция - нарушение сплошности земной коры. Блочное строение повышает подвижность твердых оболочек Земли, т.к. деформация блоков дополняется их смещением друг относительно друга.

Любые перемещения ограниченного тела в среде вызывают деформацию сдвига на его границе. Эта деформация может осуществляться либо в режиме крипа, либо локализоваться в узкой протяженной области сильно нарушенной сплошности, называемой разломом.

Дезинтеграция сплошной среды путем развития сети трещин в объеме твердого тела обусловлена присутствием в теле разномасштабных и разнородных неоднородностей, на которых при деформировании тела концентрируются напряжения и зарождаются трещины.

Оценим параметры медленного движения твердого тела в земных недрах, при котором возникает дезинтеграция и формируется разлом. Воспользуемся разобранным в предыдущей главе примером. Пусть имеется плоский слой толщиной L , границы которого смещаются друг относительно друга со скоростью V . В случае однородной деформации ее скорость внутри слоя будет равна $\dot{\epsilon} = V/L$, а напряжения на неоднородностях: $\sigma_l = \rho c_t^2 \frac{V}{L}$.

Перепишем последнюю формулу в виде:

$$\frac{\sigma_l}{\rho c_t^2} = \frac{V}{v} \cdot \frac{l}{L}$$

Легко видеть, что структура напряженных неоднородностей в телах разного масштаба L будет подобной, если одинаковые напряжения будут на неоднородностях, размеры которых пропорциональны размеру тела $l/L = \text{const}$. При этом скорость смещения граничных поверхностей тела V должна быть одинаковой, не зависящей от величины тела L .

Зародыши трещин могут возникнуть на неоднородностях, на которых $\sigma_l/\rho c_t^2$ достигает предела прочности материала $\sigma^*/\rho c_t^2$.

Обозначим размер такой неоднородности l_0 . Расстояние L_0 между неоднородностями размера l_0 определяется их концентрацией в объеме:

$$\left(\frac{L_0}{l_0}\right)^3 = \frac{\pi \cdot Q}{2}$$

Будем считать, что дезинтеграция тела имеет место, если на толщине его L уместается десять трещин $L/L_0 = 10$. Подставляя в формулу принятые отношения, получим:

$$\frac{\sigma^*}{\rho c_t^2} = \frac{V^*}{v} \left(\frac{2}{\pi \cdot Q}\right)^{1/3} \cdot \frac{1}{10}.$$

Прочность горных пород σ^* меняется в широких пределах, но отношение $\sigma^*/\rho c_t^2$ практически постоянно. Добротность в литосфере Земли имеет порядок 10^2 . Других констант формула не содержит, так что скорость смещения граничных поверхностей слоя V^* , может служить удобным критерием дезинтеграции горных пород в массиве. Преобразуя полученное соотношение и подставив $\sigma^*/\rho c_t^2 = 2 \cdot 10^{-3}$ и $Q = 100$, оценим V^* :

$$V^* = 10v \frac{\sigma^*}{\rho c_t^2} \left(\frac{\pi \cdot Q}{2}\right)^{1/3} \approx 6 \text{ см/год.}$$

Исходя из этой оценки можно полагать, что дезинтеграция горных пород будет наблюдаться там, где скорость подвижки граничных поверхностей тела достигает нескольких сантиметров в год. При меньших скоростях деформация будет осуществляться в режиме крипа.

Можно определить средние напряжения сдвига τ на граничных поверхностях тела для предельной скорости их смещения $V=V^*$:

$$\tau = \rho c_t^2 \frac{\dot{\epsilon}}{v} \frac{2}{\pi \cdot Q} \int_0^{l_0} l dl \ln l$$

(В случае крипа верхний предел интегрирования $l_m = L \left(\frac{2}{\pi \cdot Q} \right)^{1/3}$, а не l_0)

$$\tau = \rho c_t^2 \frac{2}{\pi \cdot Q} \frac{\dot{\epsilon} l_0}{v} = \rho c_t^2 \frac{2}{\pi \cdot Q} \frac{\dot{\epsilon} L}{v} \frac{l_0}{L}.$$

Подставляя $\frac{l_0}{L} = \left(\frac{2}{\pi \cdot Q} \right)^{1/3}$ и $\frac{L_0}{L} = \frac{1}{10}$; $\dot{\epsilon} L = V^*$, получим:

$$\tau = \frac{\rho c_t^2}{10} \left(\frac{2}{\pi \cdot Q} \right)^{4/3} \cdot \frac{V^*}{v}.$$

Если $\rho c_t^2 = 5 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$; $Q = 10^2$; $V^*/v = 1/10$, то $\tau = 6 \text{ кг/см}^2$.

Обращает на себя внимание очень низкое напряжение сдвига на границе слоя. Столь слабая сопротивляемость твердого тела изменению формы при малых скоростях деформации сближает это тело с вязкой жидкостью, тем более, что и в слое вязкой жидкости напряжения на границе слоя так же пропорциональны скорости смещения границы: $\tau = \eta \frac{V}{L}$, где η - коэффициент динамической вязкости. Переходя к безразмерным параметрам, чтобы иметь представление о подобии разномасштабных течений, получим:

$$\frac{\tau}{\rho V^2} = \zeta(Re), \text{ где } Re = \frac{\rho L V}{\eta} - \text{число Рейнольдса.}$$

Для ламинарного течения $\zeta(Re) = 1/Re$, а для турбулентного $\zeta = \text{const}$. Критерием перехода от ламинарного к турбулентному является определяемое в эксперименте критическое число Re^* .

В твердом теле увеличение скорости смещения выше критической приводит к появлению в объеме тела сильно напряженных неоднородностей, на которых зарождаются трещины. Дезинтеграция так же приводит к нарушению однородности деформаций в теле.

Напомним, что при всем сходстве этих явлений есть существенное различие между ними: в жидкости структура формируется за счет кинетической энергии, а в твердом теле - упругой. Различны и механизмы диссипации энергии.

В заключение отметим еще одну особенность дезинтеграции твердого тела при медленном деформировании: она стремится локализоваться в узкой зоне. В свете изложенных выше представлений этот эффект следует объяснять не какими-либо энергетическими выгодами, а из чисто кинематических соображений: чем тоньше слой, тем быстрее завершается дезинтеграция, т.к. в тонком слое выше скорость деформации $\dot{\epsilon} = V/L$.

4.0 режим оползней на горных склонах.

Перенос масс по склонам под действием силы тяжести - один из активных рельефообразующих процессов.

Экзогенные процессы весьма разнообразны. Наиболее опасными для человека являются сели, лавины, оползни. Сели и лавины возникают там, где возможно накопление рыхлообломочного материала на верхних уровнях склонов и долин. Под воздействием землетрясений или обильного увлажнения скопление рыхлообломочного материала теряет устойчивость и, двигаясь по склону, увеличивает свою массу. Таким образом лавина или сель наращивают свою разрушительную энергию.

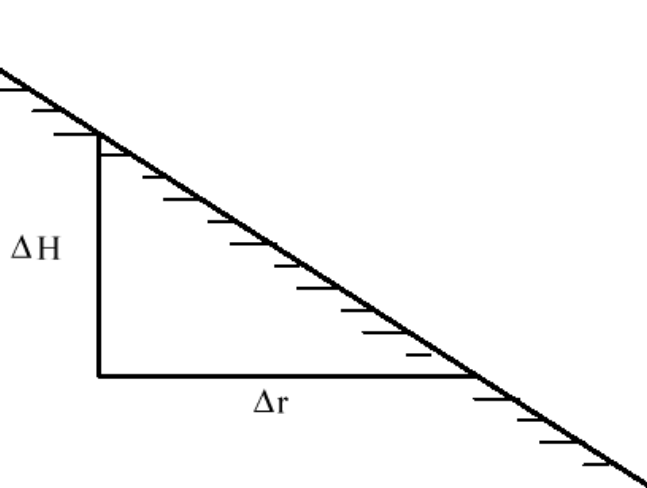
Иначе обстоит дело с оползнями. Подготовка их идет скрытно и обусловлена деформацией массива вблизи склона. Можно наблюдать склоны, хранящие следы многочисленных оползней, что свидетельствует о регулярности этого процесса. Хотя каждое отдельное событие может быть вызвано землетрясением или изменением водного режима, их нельзя считать причиной возникновения оползней.

Подготовка оползня начинается с формирования границы, отделяющей некоторый объем горной массы от массива, вблизи которой локализуется сдвиговая деформация. Вдоль этой границы повышается пористость и проницаемость. В случае насыщения этой зоны водой сопротивление сдвигу может упасть практически до нуля, что и вызовет оползень.

Деформационный процесс, в результате которого формируется тело оползня, протекает очень медленно и сопровождается дезинтеграцией сплошной среды.

Роль геометрического фактора при формировании оползня выявляется из условия равновесия сил, действующих на отделяемый от массива блок (см. рис.5).

Рис.5.



Силы, действующие вдоль границ протяженностью ΔH и Δr равны соответственно $\sigma \Delta H$ и $\sigma \Delta r$. Их проекция на линию склона, вдоль которой происходит движение горной массы, должна равняться проекции силы тяжести:

$$-\sigma \cdot \sqrt{\Delta H^2 + \Delta r^2} = \frac{\Delta r \cdot \Delta H}{2} \rho g \frac{\Delta H}{\sqrt{\Delta H^2 + \Delta r^2}}$$

Здесь ρ - плотность горной массы, g - ускорение силы тяжести.

После преобразований, полагая $|\Delta H/\Delta r| < 0,5$ и пренебрегая $(\Delta H/\Delta r)^2$ по сравнению с единицей, определим линейный размер блока $L = \Delta H$:

$$L \approx \Delta H = \frac{2\sigma}{\rho g} \cdot \frac{1}{|\Delta H/\Delta r|}$$

Размер оползневой блока зависит от крутизны склона и напряжения сдвига в слое L . Опасность вычленения блока возникает тогда, когда скорость движения по склону достигает $V=6\text{см/год}$. Этому значению скорости соответствует напряжение сдвига

$$\sigma = \rho c_t^2 \left(\frac{2}{\pi \cdot Q} \right)^{4/3} \cdot \frac{V^*}{v} \cdot \frac{1}{10}.$$

Подставляя $\rho c_t^2 = 10^5 \text{кг/см}^2$; $\pi Q/2 = 100$, получим:

$\sigma = 10^5 \cdot 0,2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-1} = 2 \text{кг/см}^2$. Найденная величина напряжения сдвига позволяет определить размер оползневой блока ($\rho = 2 \text{г/см}^3$):

$$L = 20 \frac{1}{|\Delta H/\Delta r|} \text{ м.}$$

Время подготовки оползневой явления определяется временем дезинтеграции горных пород в теле блока. Локализация сдвиговой деформации по границам блока занимает относительно мало времени в силу уменьшения размеров деформационной зоны и соответствующего увеличения скорости деформации. Дезинтеграционный процесс в объеме обычно завершается формированием блочной структуры при средней деформации, измеряемой первыми процентами.

Таким образом, время подготовки оползня по порядку величины может быть оценено по формуле:

$$\Theta = \frac{L}{V^*} \varepsilon^*$$

Полагая необходимую для завершения процесса дезинтеграции общую деформацию тела в пределах будущего блока $\varepsilon^* = 0,01$ и $\Delta H/\Delta r = 0,5$, получим:

$$\Theta = \frac{40}{0,06} \cdot 0,01 \approx 6 \text{ лет.}$$

С уменьшением крутизны время подготовки увеличивается вместе с размерами блока.

При оползне происходит практически мгновенное перемещение массы блока на расстояние, равное его размеру. Если отнести это расстояние ко времени подготовки оползня, получим эффективную скорость массопереноса посредством оползней:

$$V_{\text{эф}} = \frac{L}{\Theta} = \frac{V^*}{\varepsilon^*} = 6 \text{ см/год} \cdot 100 = 6 \text{ м/год.}$$

Как видно на этом примере, эффективная скорость массопереноса в слое толщиной L достигает заметной величины.

Изложенная схема подготовки оползня может служить основой ранней диагностики оползневой опасности.

5. Горизонтальные слои нарушенной сплошности в земной коре.

Движение, при котором могли бы возникнуть горизонтальные слои дезинтегрированной горной породы, должно быть направлено практически вдоль эквипотенциальной поверхности. Это означает, что собственное гравитационное поле такое движение не может обеспечить энергией. Разумеется, можно придумать такую конфигурацию поверхности скольжения для лежащей на ней деформируемой плиты, чтобы горизонтальное движение возникло под действием силы тяжести, но это не будет типичным для земных условий.

Вместе с тем, удивительным представляется, что эффективная толщина атмосферы (~ 10км), глубина океана и толща земной коры вполне соизмеримы. Удивительно и то, что все они близки по величине к такому характеристическому линейному размеру, который получается при делении квадрата линейной скорости вращения вокруг оси на ускорение силы тяжести:

$$\frac{V^2}{g} = \frac{(350 \text{ м/сек})^2}{10 \text{ м/сек}^2} \approx 10^4 \text{ м} = 10 \text{ км}$$

Такое совпадение наводит на размышления о роли механического движения в процессе формирования тонких структур геосфер.

Среди возможных объяснений нам представляется правдоподобным связать это структурирование с действием приливных волн. Скорость распространения гравитационных волн в тонком слое тяжелой жидкости равна $c = (gH)^{1/2}$, следовательно, в атмосфере и океане они будут двигаться практически со скоростью вращения $(gH)^{1/2} = (10 \cdot 10^4)^{1/2} \approx 330 \text{ м/сек}$. Имея ту же скорость, что и приливная волна, гравитационная волна будет при своем движении подпитываться энергией за счет действия приливных сил.

Очевидно, что при таком "резонансном" режиме можно получить максимум механической энергии для структурирования геосфер. Для количественных оценок, подтверждающих эту догадку, нужно специальное исследование, которое еще предстоит сделать.

Вернемся к обсуждению структурирования земной коры. Амплитуда смещения на поверхности твердотельной оболочки Земли при прохождении приливной волны равна примерно 0,5м. По сравнению со скоростью упругих волн приливная волна движется медленно, так что в целом для Земли деформация ее может быть оценена в квазистатическом приближении. Однако на этом фоне могут возникнуть перемещения в верхних слоях литосферы, которые внесут свой вклад в приливное движение, подобно тому, как это происходит в океане.

Блочное строение земной коры не позволяет отождествить ее с упругой оболочкой. Для выяснения кинематики поверхностных слоев в приливной волне более всего подходит модель тяжелой жидкости. Гравитационная волна в достаточно глубоком слое жидкости распространяется со скоростью, зависящей от длины волны. Амплитуда колебаний быстро убывает с глубиной. Для скоростей смещения частиц в гравитационной волне имеются формулы:

$$v_x = A\omega e^{-kz} \sin(kx - \omega t)$$

$$v_z = A\omega e^{-kz} \cos(kx - \omega t).$$

Движение вдоль поверхности совмещено с направлением оси x , ось z направлена от поверхности в глубину жидкости.

$\omega = \sqrt{k \cdot g}$ - частота колебаний; $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ - длина волны; A - амплитуда.

Скорость распространения гравитационной волны:

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{k}} = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{8\pi}}$$

Представляют интерес только те волны, которые благодаря совпадению их скорости со скоростью приливной волны могут получать механическую энергию при своем движении. На средних широтах скорость распространения приливной волны ~ 350 м/сек. Подставив эту величину в формулы, получим:

$$1/k = 48 \text{ км}; \lambda = 300 \text{ км}.$$

В рамках предложенной кинематической схемы нетрудно оценить глубины, на которых могут разыграться процессы дезинтеграции твердой среды.

Бегущие поверхностные волны за один цикл необратимо переносят частицы в направлении движения волны на величину порядка A/Q , где Q - добротность твердого тела - земной коры.

Так как амплитуда уменьшается с глубиной, происходит медленное смещение верхних слоев относительно нижних. Эту типично сдвиговую деформацию можно вблизи поверхности полагать равной производной по z :

$$\epsilon = \frac{1}{Q} \cdot \frac{d(Ae^{-kz})}{dz} \Big|_{z=0} = \frac{A \cdot k}{Q}$$

За год совершается 730 циклов, так что скорость деформации будет равна:

$$\dot{\epsilon} = 730 \frac{A \cdot k}{Q} \text{ 1/год}$$

Скорость подвижки поверхности по отношению к слою на глубине H возрастает с глубиной:

$$V = \dot{\epsilon} H = 730 \frac{A k}{Q} H.$$

Нарушение сплошности может возникнуть в слое H в том случае, если поверхность будет смещаться с относительной скоростью $V^* = 6$ см/год. Отсюда получаем минимальную глубину, начиная с которой в земной коре возможна дезинтеграция под действием приливных сил:

$$H = V^* \frac{Q}{A \cdot k \cdot 730}$$

Принимая $V^* = 6$ см/год; $Q = 100$; $A = 5$ см; $1/k = 48$ км, находим: $H \approx 8$ км.

Если вклад гравитационной волны в приливное движение составит менее 10% (5 см), то глубина слоя дезинтеграции увеличится. К сожалению, нам не известны попытки выделить на записях приливной волны собственно гравитационную волну.

Глава IV. Дифференциация вещества в Земле

Наличие тяжелого ядра свидетельствует о дифференциации вещества уже после завершения формирования планеты Земля, когда ее масса достигла практически современной величины. Возникнув в результате слипания тел, первичная Земля имела, естественно, неоднородный вещественный состав и, как следствие, имела в теле плотностные неоднородности разного масштаба. В собственном гравитационном поле эти неоднородности создали огромный запас потенциальной энергии. Дифференциация вещества и связанные с ней движение и нагрев твердой среды преобразуют внутреннее строение Земли, формируя устойчивые структуры и энергетические потоки. Представляет известный интерес оценка роли, которую играет процесс дифференциации вещества в современную эпоху, а также как и в чем он проявляется. Поскольку речь идет о запасе механической энергии, реализуемой в процессе дифференциации вещества, естественно исследовать в первую очередь механическую модель этого процесса.

Представим простейшую модель движения плотностных неоднородностей в твердой среде в гравитационном поле Земли, которая позволяла бы в самом общем виде выполнить количественные оценки параметров механического движения и тепловых эффектов, с ним связанных.

1. В основе механической модели дифференциации вещества лежат представления о плотностной неоднородности первичной Земли. Достаточных экспериментальных данных для этого в нашем распоряжении нет. Поэтому воспользуемся структурой неоднородностей, которая возникает в процессе случайного слипания тяжелых и легких тел одинакового размера. (Эта идея была подсказана К.Е.Губкиным.) Способ, каким была построена структура, изложен в приложении. Отметим качественную особенность такого рода структур. В среде, составленной из легких и тяжелых кубиков одинакового размера так, что вероятность встречи с кубиком каждого сорта при пространственном сканировании среды равна одной второй, с уменьшением разрешающей способности сканирующего устройства обнаруживается наряду с объемами, имеющими приблизительно среднюю плотность, устойчивая доля объемов повышенной и пониженной плотности. Если разрешающую способность определять размером сканирующего пятна в единицах длины ребра базисного кубика, то отличие плотности тяжелых и легких объемов от среднего будет обратно пропорционально разрешающей способности. Другими словами, увеличивая объем, в пределах которого производится усреднение плотности, получаем различие в плотностях случайно выбранных одинаковых объемов, которое уменьшается обратно пропорционально их линейному размеру. При этом частота встречи с нейтральным (со средней плотностью), тяжелым и легким объемом в такой среде сохраняется на всех масштабных уровнях.

Обозначим линейный размер базисного кубика L . Плотность тяжелого базисного кубика примем равной 8г/см^3 , а легкого - 2г/см^3 , так что средняя плотность среды, сложенной из этих кубиков, окажется равной 5г/см^3 . Рассмотрим

в этой среде объемы разного линейного размера: $L_K = 2^k L_*$ (k - масштабный уровень). На каждом уровне можно выделить объемы с примерно средней плотностью и объемы с плотностью, отличной от средней на величину $\pm \Delta \rho_K$. Условную границу между объемами, которые будут отнесены к нейтральным, и теми, которые будем называть тяжелыми или легкими неоднородностями, очевидно, нужно провести так, чтобы вероятность встречи с нейтральным объемом при случайной выборке равнялась $1/2$, с тяжелым $1/4$ и с легким также $1/4$. При этом оказывается, что для $L_K > 4L_*$ выполняется следующее соотношение:

$$\Delta \rho_K = \pm 4 \frac{L_*}{L_K} \text{ г/см}^3$$

Построенная путем случайной укладки одинаковых по размеру базисных кубиков (тяжелого и легкого с равной вероятностью) среда обладает иерархической регулярной структурой неоднородностей.

Доля пространства, занятая неоднородностями на каждом уровне иерархии, одинаковы: $1/4$ легкими; $1/4$ тяжелыми.

2. Запас потенциальной энергии у легкого и тяжелого объемов является необходимым условием возникновения движения, но недостаточным. Сила сопротивления движению тел в конденсированной среде пропорциональна поверхности тела и сдвиговому напряжению на его границах.

При медленном деформировании твердого тела реализуется режим крипа (ползучести), так что напряжения сдвига будут пропорциональны скорости движения тела V :

$$\sigma \sim \rho c^2 \frac{V}{v} \cdot \left(\frac{2}{\pi \cdot Q} \right)^{4/3},$$

где $\rho c^2 = \mu$; $v = 2 \cdot 10^{-6}$ см/сек.

Подобно вязкой жидкости, где с превышением скорости движения выше некоторого критического значения возникает турбулентность в потоке, обтекающем тело; в твердой среде, так же при достижении некоторой критической скорости V^* , происходит дезинтеграция твердой среды в ближайшей окрестности тела.

Это обстоятельство представляется очень важным для выделения тех объемов с отличной от средней плотностью, которые способны участвовать в механической дифференциации вещества.

Выделенные нами статистическим анализом разномасштабные плотностные неоднородности при своем движении в поле силы тяжести быстро "размоются", обмениваясь с окружающей средой массой, если только в этом движении они не приобретут четкие физические границы.

Дезинтеграция среды по границам тела возникает только при достижении скорости V^* . Следовательно, все тела с меньшей скоростью движения существенного вклада в процесс дифференциации вещества внести не могут.

Одинаковая скорость движения тел разного размера $V = V^*$ означает, что и напряжения сдвига (σ) на границе этих тел также будут одинаковы. Приняв $\sigma^* / \rho c_t^2 = 2 \cdot 10^{-3}$; $Q = 100$; $L/L_0 = 10$; $\rho c_t^2 = 5 \cdot 10^{12}$ дин/см², получим:

$$V^* = v \frac{\sigma^*}{\rho c_t^2} \frac{L}{L_0} \left(\frac{\pi \cdot Q}{2} \right)^{1/3} \approx 6 \text{ см/год.}$$

$$\sigma = \rho c_t^2 \left(\frac{2}{\pi \cdot Q} \right)^{4/3} \cdot \frac{V^* L_0}{v L} \sim 10^7 \text{ дин/см}^2.$$

Составив уравнение действующих на неоднородность сил, можно определить размер базисного кубика L_* , который нормирует полученную иерархическую структуру.

Полагая, что неоднородности имеют кубическую форму, получим следующее выражение для объемной силы тяжести:

$$\Delta \rho_K \cdot g L_K^3 = \frac{4L_*}{L_K} g L_K^3 = 4L_* g L_K^2$$

Поверхностная сила сопротивления движению равна напряжению сдвига, помноженному на площадь поверхности тела: $10^7 \cdot 6 \cdot L_K^2$ дин.

Приравнявая объемную и поверхностную силу, получим:

$$4L_* \cdot 10^3 L_K^2 = 10^7 \cdot 6 L_K^2.$$

Отсюда $L_* = 1,5 \cdot 10^4 \text{ см} = 150 \text{ м}$. Как следует из приведенного выше баланса сил, для всех неоднородностей $L_K > 4L_*$ ($\kappa > 2$) размер L_K в левой и правой частях уравнения сокращается. Это означает, что неоднородности на всех уровнях иерархии одинаково чувствительны к действию силы тяжести. Имеет место динамическое подобие движущихся

неоднородностей на всех уровнях ($\kappa \geq 2$): одинаковая скорость движения, одинаковые напряжения на граничных поверхностях, одинаковая вероятность встречи с неоднородностью в произвольной точке, т.к. на каждом уровне тяжелые и легкие занимают одну и ту же часть пространства.

Естественно поэтому низшим уровнем иерархии считать $\kappa=2$.

$L_2 = 4L_* = 600 \text{ м}$. О верхнем уровне иерархической структуры неоднородностей будет сказано позже.

3. Все неоднородности всех уровней находятся в одинаковых условиях и поэтому их участие в процессе дифференциации вещества равновероятно. Но все они одновременно не могут находиться в движении - это зависит от их окружения: тяжелая или легкая неоднородность только тогда будет двигаться под действием сил Архимеда, когда ее ближайшее окружение будет иметь среднюю плотность.

Продолжая использовать кубическую форму в количественных оценках, будем считать, что благоприятное окружение неоднородности для реализации ее потенциала состоит из 6 (по числу граней) нейтральных кубиков того же размера. Вероятность такой ситуации равно произведению вероятностей оказаться в одном месте одному тяжелому (легкому) и шести нейтральным кубикам:

$$\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^6 = \frac{1}{256}$$

Таким образом, в каждый момент времени движущиеся плотностные неоднородности каждого уровня занимают $1/256$ часть пространства и в силу их рассредоточенности практически не взаимодействуют друг с другом, Число

легких, всплывающих неоднородностей равно числу тяжелых, тонущих, поэтому можно предположить, что нейтральные объемы (со средней плотностью) остаются неподвижными. Потоки вещества к поверхности и к центру по объему скомпенсированы.

4. Суммарный массопоток в одном направлении в силу подобия движения на всех уровнях равен потоку на низшем уровне, умноженному на число уровней в иерархической структуре. Однако избыточную массу переносят главным образом неоднородности низшего уровня, а все остальные, вместе взятые, переносят еще столько же. Фактически механическая дифференциация вещества осуществляется плотностными неоднородностями первых 3-4 уровней. Их размеры: низший, $\kappa=2$, $L_2=600\text{м}$; $\kappa=3$, $L_3=1200\text{м}$; $\kappa=4$, $L_4=2400\text{м}$; $\kappa=5$, $L_5=4800\text{м}$.

Перенос избыточной массы к границе мантии с ядром осуществляют одновременно два потока: тяжелых и легких неоднородностей. Тяжелые занимают место легких, так что массу, доставляемую тонущими неоднородностями, нужно удвоить.

Оценим перенос избыточной массы на низшем уровне $\kappa=2$, $L_2=600\text{м}$. Объем всех движущихся неоднородностей одного уровня равен $1/256$ объема мантии

$$\sum L_K^3 \approx \frac{10^{27}}{256} \approx 4 \cdot 10^{24} \text{см}^3$$

Число движущихся тяжелых объемов низшего уровня ($L_2=6 \cdot 10^4 \text{см}$):

$$N_2 = \frac{\sum L_K^3}{L_2^3} = \frac{10^{27}}{256 \cdot 216 \cdot 10^{12}} = 2 \cdot 10^{10}$$

Все они опускаются со скоростью $V^*=6\text{см/год}$. Интервал времени τ , потребный для прохождения их через толщу мантии в 3000 км, равен

$$\tau = \frac{3 \cdot 10^8}{6} = \text{лет.}$$

Доставленная тяжелыми неоднородностями (L_2) масса равна их объему, помноженному на $\Delta\rho=1\text{г/см}^3$, а суммарное ее количество, поступающее в ядро от потоков тяжелых и легких неоднородностей всех уровней в 4 раза больше:

$$\Delta m = 4 \cdot \frac{10^{27}}{256} \cdot 1 \approx 1,6 \cdot 10^{25} \text{г.}$$

Относя эту массу ко времени τ , получим скорость нарастания массы ядра:

$$\frac{1,6 \cdot 10^{25}}{5 \cdot 10^7} \approx 3 \cdot 10^{17} \text{г/год.}$$

Для того, чтобы масса ядра достигла современной величины, нужно было увеличить первоначальную массу примерно вдвое, добавив 10^{27}г .

Механическая дифференциация вещества способна доставить эту массу к ядру лишь за $3 \cdot 10^9$ лет.

Эта оценка показывает, что процесс формирования внутренних геосфер в результате дифференциации вещества протекает практически в стационарном

режиме на протяжении всей истории Земли и наша современная эпоха в этом плане не должна отличаться от предшествующих.

Всплывание легких объемов и погружение тяжелых вблизи границ литосферы может воссоздавать области неустойчивого состояния в земной коре, которые реализуют свою энергию в деформационных процессах.

Заслуживает специального обсуждения и взаимодействие плотностных неоднородностей с приливными волнами.

5. Преодолевая силы сопротивления, действующие на поверхности, движущееся тело совершает работу, которая ведет к разогреву как самого тела, так и окружающей среды. Если размеры тела малы, область прогрева окружающей среды оказывается много больше самого тела, границы тела теряют четкость и активный массообмен с окружающей средой приводит к его размыванию.

Минимальные размеры устойчивого тела по тепловому критерию можно оценить из условия: скорость движения тела и температурного фронта должны быть равны. Скорость движения равна $V^* = 6 \text{ см/год}$. То, что можно назвать условно температурным фронтом, определим через коэффициент температуропроводности K^2 :

$V_m = k^2/L$, где L — размер движущейся нагретой неоднородности.

Для горных пород $k^2 \sim 3 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{год}$. Приравнивая скорости V_m и V^* , получим

$$L_{\min} = \frac{30 \cdot 10^4}{6} = 5 \cdot 10^4 \text{ см} = 500 \text{ м}.$$

Тело, движущееся со скоростью 6 см/год, будет сохранять свои границы и механическую устойчивость при условии, что его размеры превосходят 500 м. Размер неоднородностей на низшем уровне используемой нами иерархической структуры равен 600 м и этому условию удовлетворяет.

Вещественная неоднородность дает убывающее отличие по плотности с ростом размера движущегося тела. Так для тел размером $L \sim 100 \text{ км}$ это отличие составляет примерно 1/1000 средней плотности. Но такого же порядка изменения плотности могут возникнуть при разности температур всего в 100°K . По этой причине нужно ввести ограничение на участие в процессе механической дифференциации очень крупных тел. По-видимому, верхний иерархический уровень следует ограничить $k=6$, $L_6=64 \text{ км}$. Таким образом, активное участие в механической дифференциации вещества принимают всего пять уровней $2 < k < 6$.

6. Погружающиеся и всплывающие тела одного размера с одинаковыми $\Delta\rho$ получают при своем движении одну и ту же энергию, но их разогрев при прохождении всей толщи мантии будет различным, т.к. их начальные состояния различны.

Оценим тепловой поток, который создается всплывающими телами в результате их разогрева при движении сквозь толщу мантии.

Энергию для разогрева тело получает за счет изменения своего гравитационного потенциала:

$$\Delta\rho_K \cdot L_K^3 \cdot gH, \text{ где } H=3000 \text{ км}.$$

Половина этой энергии тратится на нагрев окружающей среды, другая половина остается в теле. Отличие плотности тела от среднего значения уменьшается с увеличением среднего размера тела. Поэтому достаточно

определить энергию тел низшего уровня, вклад которых составляет более половины всей подводимой к поверхности энергии.

Число тел низшего уровня ($L_2=600\text{м}$ и $\Delta\rho=1\text{г/см}^3$) в мантии равно $2\cdot 10^{10}$. За время $5\cdot 10^7$ лет все они достигнут поверхности и каждое передаст энергию:

$(1/2)\cdot\Delta\rho_2\cdot L_2^3\cdot gH=(1/2)\cdot 216\cdot 10^{12}\cdot 10^3\cdot 3\cdot 10^8=3\cdot 10^{25}$ эрг. Тогда суммарный поток тепла через поверхность будет равен:

$$\frac{2\cdot 3\cdot 10^{25}\cdot 2\cdot 10^{10}}{5\cdot 10^7} \approx 2\cdot 10^{28} \text{ эрг/год.}$$

Точно такая же энергия должна доставляться тяжелыми телами к ядру и приводить к его разогреву. Однако этот процесс должен быть ограничен во времени, т.к. тепловая емкость ядра ограничена. Плотность энергии в телах низшего уровня ($L_2=600\text{м}$) после прохождения через мантию равна:

$$\frac{3\cdot 10^{25}}{216\cdot 10^{12}} \approx 1,5\cdot 10^{11} \text{ эрг/см}^3$$

Очевидно, что по мере приближения к этому значению внутренней энергии ядра рост температуры ядра будет замедляться и в действие вступят различные механизмы теплоотвода. Характерное время интенсивной закачки энергии в ядро объемом 10^{26}см^3 равно:

$$\frac{1,5\cdot 10^{11}\cdot 10^{26}}{2\cdot 10^{28}} \approx 10^9 \text{ лет.}$$

Если учесть теплоотвод, то время это должно существенно возрасти, т.к. скорее всего нарастание температуры будет замедляться по экспоненте с тем же характерным временем 10^9 лет.

Поскольку половина энергии рассеивается движущимися телами в мантии, постольку происходит ее равномерный по объему разогрев. Энергия, поглощаемая мантией ежегодно в результате движения в ней тяжелых и легких тел, равна $4\cdot 10^{28}$ эрг/год.

Если распределить ее равномерно по объему Земли, полагая теплоемкость равной $4\cdot 10^7$ эрг/°К·см³, получим годовой прирост температуры:

$$\frac{4\cdot 10^{28}}{4\cdot 10^7\cdot 10^{27}} = 10^{-6} \text{ °К/год.}$$

Эта величина прироста средней температуры свидетельствует о существенном энергетическом вкладе механической дифференциации вещества в тепловые процессы Земли.

7. По мере нагрева Земли возрастает роль крупных движущихся тел в процессах теплопереноса. Тела низшего иерархического уровня служат генераторами, источниками тепла. Крупные тела высоких уровней при своем движении мало нагреваются, но зато переносят почти неизменной свою внутреннюю энергию из одной части пространства в другую. Так, погружаясь, крупное тело оказывается на больших глубинах более холодным, чем окружающая среда, и таким образом отбирает у нее часть энергии. Наоборот, всплывающее крупное тело, сохраняя свою начальную внутреннюю энергию, оказывается столь сильно перегретым, что в результате снижения давления будет расплавлено. Можно полагать, что при разности температур на границе с ядром и вблизи литосферы порядка 1000°К тепловые потоки, связанные с движением крупных

тел и выравнивающие температуру в мантии, будут соизмеримы с теплом, производимым движущимися телами низшего уровня иерархии. Важно отметить, что вещественная дифференциация сопровождается воспроизводством нестационарных температурных полей.

Что касается распределения тепловых источников в мантии, то в соответствии с моделью механической дифференциации вещества наибольшее количество тепла должно продуцироваться в верхней мантии вблизи границы с литосферой.

Модель механической дифференциации вещества демонстрирует, как в среде, сложенной из разнородных тел, случайным образом размещенных в пространстве, возникает в гравитационном поле иерархическая структура тел с закономерно изменяющейся плотностью при переходе от одного уровня к другому. Эта структура регулирует процесс дифференциации вещества. Ее устойчивость обусловлена самовоспроизводимостью иерархии, которая в свою очередь является базой стационарных режимов.

Приложение

Иерархическая структура, возникающая при укладке кубиков одного размера, но разного цвета, белого и черного, при равной вероятности случайного выбора цвета кубика.

Под структурой будем понимать распределение темных и светлых объемов на общем сером фоне на разных масштабных уровнях.

Пусть в нашем распоряжении имеется два мешка: в одном белые кубики (a_0), в другом черные (b_0). Выбирать каждый раз кубики будем по жребию и, плотно укладывая, будем заполнять большой ящик. В конечном счете кубики разных цветов окажутся перемешанными так, что большие объемы в этом ящике будут казаться одинаково серыми. Однако, если научиться различать полутона, то однородность цветовую придется поставить под сомнение.

Рассмотрим варианты укладки черных и белых кубиков в кубический объем, вмещающем 8 кубиков. Пусть вначале он заполнен только белыми кубиками. Замена одного белого на черный может быть осуществлена восемью способами, замена двух уже 24 способами и т.д. Приведем эти числа в таблице 2.

Таблица 2

Число возможных вариантов расположения
черных и белых кубиков в объеме из $8^{ми}$ кубиков

Сочетание (a)-белых (b)-черных	и	$7a_0$	$6a_0$	$5a_0$	$4a_0$	$3a_0$	$2a_0$	$1a_0$	$8b_0$
	$8a_0$	$1b_0$	$2b_0$	$3b_0$	$4b_0$	$5b_0$	$6b_0$	$7b_0$	
Число вариантов	1	8	24	56	78	56	24	8	1

Всего вариантов $(2)^8=256$. Если следить только за чисто белыми и чисто черными сочетаниями, то они в ящике, где разместились $8 \cdot 256 \sim 2 \cdot 10^3$ кубиков, встретились бы по одному разу. С увеличением объема вероятность того, что он будет состоять из одноцветных кубиков, становится ничтожной.

Попробуем ввести иную градацию объемов по цвету. Будем считать объем из 8 кубиков серым, если в нем превышение количества кубиков одного цвета над другим меньше или равно 2, соответственно остальные разобьем на две группы - светлые (а) и темные (b). В этом случае вероятность обнаружения в нашем ящике темных или светлых будет равна $\sim 1/7$, а серых (с) $5/7$. Именно такие части объема ящика будут занимать кубики разного цвета.

Если теперь из нового набора кубиков ($L_1=2L_0$) будем тем же способом исследовать варианты расположения темных, светлых и серых кубиков в кубе с линейным размером $L_2=2L_1=4L_0$, то получим следующий результат: вероятность сочетания, дающего нейтральную, серую окраску, равна $1/2$, а темную или светлую $1/4$. При этом светлые и темные объемы (L_2^3) поблекли по сравнению со светлыми и темными объемами (L_1^3) примерно в два раза: число избыточных белых и черных кубиков на единицу объема, придающих им отличную от серой среды окраску, уменьшилось вдвое.

Повторяя эту процедуру, обнаруживаем, что доли общего объема, занимаемые и на следующем уровне ($L_3=8L_0$) светлыми, темными и нейтральными кубиками, остается той же ($1/4$; $1/4$; $1/2$). А число избыточных черных и белых кубиков в единице объема окрашенных кубиков убывает с их размером по закону:

$$n = \frac{1}{3} \cdot \frac{L_2}{L_k}, \text{ где } L_k = 2^k L_0.$$

Если рассматривать среду, составленную из черных и белых кубиков одного размера (L_0) как бы с разных расстояний, когда пространственная разрешающая способность уменьшается, но при этом соответствующим образом повышать чувствительность к полутонам, то при любом размере рассматриваемой части этого пространства перед нами будет вырисовываться одна и та же пестрая картина: на сером фоне случайным образом разбросаны темные и светлые пятна. Иерархическая структура пространства с изменением масштаба оказывается подобной сама себе.

Разумеется, для того, чтобы это увидеть, нужно по мере увеличения поля зрения повышать чувствительность к полутонам. Однако в природе подобное может происходить самым естественным образом.

Так, например, действие гравитационных сил увеличивается с размером плотностных неоднородностей в среде, так что даже малое отличие по плотности, но в большом объеме, становится значимым для механики.

Глава V. Гидродинамическая сеть Земли

Гидросферу обычно отождествляют с мировым океаном. Гидромеханика океанов вполне самостоятельный раздел геомеханики. На поверхности материков речные стоки осуществляют перенос вместе с водой значительных масс твердых частиц, образуемых вследствие эрозии твердой поверхности, участвуя таким образом в преобразующих ландшафт процессах.

В свободном состоянии вода присутствует и в земных недрах, по крайней мере, в земной коре. Вода заполняет пористые проницаемые пласты в осадочных толщах, полости и трещины в скальных массивах.

Непрерывное перемещение масс в земных недрах, воспроизводящее динамические структуры, создает протяженные слои дезинтегрированных горных пород, проницаемые для жидкостей. В результате в недрах Земли образуется сеть каналов, по которым может циркулировать вода, обеспечивая вещественный обмен литосферы с гидросферой и атмосферой.

Влияние воды на механические свойства дезинтегрированной твердой среды поясним на примере песка. Сухой песок представляет собой случайным образом уложенные песчинки, сила сжатия в точках контакта определяется весом песка над данным горизонтом, поделенным на число контактов в нем. Силы сцепления между песчинками отсутствуют. Сила, необходимая для сдвижения одного слоя по другому (сила трения), пропорциональна силе сжатия на контактах. Внутренним трением определяется и угол склона песчаной горы.

При увлажнении песка капиллярные силы водной пленки связывают песчинки между собой. В таком песке может быть устойчивым вертикальный уступ небольшой высоты.

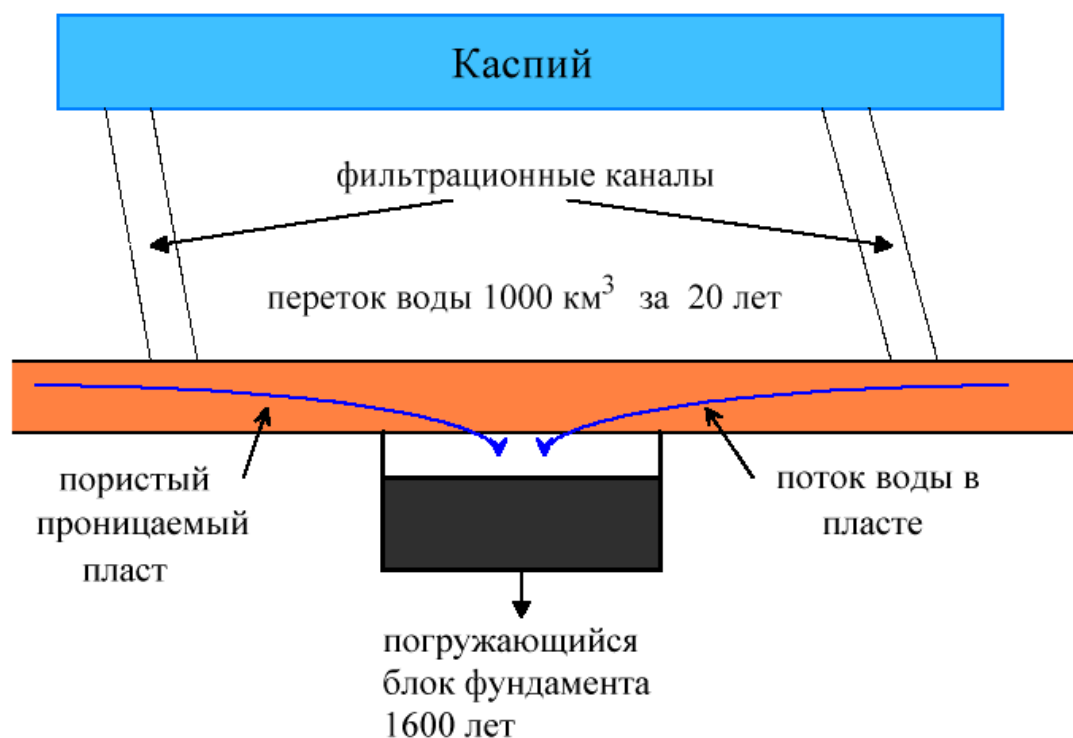
Если в песке все поры заполнить водой, то его поведение будет зависеть от того, как распределена нагрузка между водой и контактами песчинок. В случае, когда вся нагрузка воспринимается песчаным каркасом, поверхностный рельеф с перепадами высот на песчаном грунте будет устойчивым, как это можно видеть на дне реки.

Если же часть контактов между песчинками по каким-либо причинам будет утрачена, нагрузку воспримет вода и вследствие этого сила трения будет настолько малой, что произойдет так называемое разжижение песчаного грунта: угол естественного склона падает до нуля и песчаная масса, насыщенная водой, растекается как жидкость. Свободное перемещение песчинок в разжиженном песке способствует их более плотной укладке и вытеснению воды из пор, что в конечном счете остановит движение песка. Эффект разжижения песка может быть вызван динамическими подвижками на границах или внутри песчаного объема. Насыщение пористого тела водой возможно при наличии каналов между порами.

Течение жидкости через пористое тело может способствовать увеличению его проницаемости или, наоборот, уменьшению. Это зависит от вымывания или осаждения мелких частиц в пористом теле, что в свою очередь зависит от скорости течения жидкости, размеров пор и частиц. Существуют и другие

Рис.6.

Схема водообмена Каспия с подземным резервуаром.



механизмы изменения проницаемости, обусловленные химическим взаимодействием водных растворов с твердыми частицами разного химического состава.

Движение жидкости в проницаемых твердых телах происходит под действием градиента давления и силы тяжести. Пористые проницаемые слои возникают в зонах сдвиговых деформаций, например, на границах блоков. Движение блоков определяет сдвиговые напряжения на их границах.

Что касается давления в пористом межблоковом пространстве, то оно определяется изменением объема: сближением или удалением блоков друг от друга. Так как средняя плотность остается постоянной, эти перемещения блоков друг относительно друга имеют квазипериодический характер. В гидродинамической сети такое перемещение блоков выполняет роль насосов, которые поддерживают ее функционирование.

По мнению Б.Н.Голубова, водообмен с подземной гидросетью лежит в основе феномена Каспия. В течение ~ 20 лет, начиная с 1920г., наблюдалось быстрое падение уровня моря: было потеряно $\sim 1000 \text{ км}^3$ воды и понижение достигло ~ 2 м. Затем, в течение 35 лет уровень понизился еще примерно на метр. В 1977г. началось повышение уровня со скоростью $\sim 0,1 \text{ м/год}$, которое продолжается до сего времени.

Представим схему водообмена Каспия с глубокими проницаемыми пористыми слоями, которая в общих чертах воспроизводила бы этот феномен.

Допустим, что пористый пласт находится на глубине более 5 км, имеет пористость 0,1 и проницаемость 10^{-11} м^2 . Площадь пласта, активно участвующая в водообмене с Каспием, $\sim 10^6 \text{ км}^2$.

Будем считать, что гидродинамическая связь подземного резервуара с Каспием слабая и давление воды в нем может заметно отличаться от гидростатического.

Обмеление Каспия в 20 - 40 гг. могло произойти за счет сброса воды в этот подземный резервуар. Оценим объем пористого пространства в подземном резервуаре, необходимый для размещения 1000 км^3 воды. Пусть начальное давление воды в порах резервуара было на уровне атмосферного. При повышении давления до гидростатического на глубине 5 км (500 кг/см^2) за счет сжимаемости воды можно в объем V вместить еще $2,5\% V$. Таким образом необходимый объем пор для размещения 1000 км^3 воды составит:

$$V = \frac{1000}{0,025} = 4 \cdot 10^4 \text{ км}^3.$$

При пористости 0,1 объем пористого слоя будет равен $4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$. Деля объем слоя на площадь, получим среднюю толщину слоя:

$$h = \frac{4 \cdot 10^5}{10^6} = 0,4 \text{ км}.$$

Снижение давления в порах проницаемого пласта до атмосферного могло быть вызвано опусканием одного или нескольких блоков кристаллического фундамента.

Если полагать, что до 1920 г. перетоком воды из Каспия в подземный резервуар можно пренебречь, то легко оценить время (τ), необходимое для создания резервной емкости пласта за счет снижения давления в нем. Скорость перемещения блока примем равной 6 см/год , а площадь - $100 \times 100 \text{ км}^2$.

$$\tau = \frac{10^3 \text{ км}^3}{10^4 \text{ км}^2 \cdot 6 \cdot 10^{-5} \text{ км/год}} \approx 1600 \text{ лет}.$$

При медленном опускании над ним не возникает пустота, т.к. подвижность водной массы в пласте достаточна для заполнения вновь образуемого объема водой практически сразу же.

Для пласта с проницаемостью 10^{-11} см^2 скорость потока определяется формулой:

$$V(\text{см/сек}) = 10^{-2} \frac{\Delta H}{\Delta x}.$$

Градиент давления $\Delta H / \Delta x$ выражен через разность высот водяного столба на длине Δx .

Объем, освобождаемый при опускании блока фундамента за год, равен $\sim 0,6 \text{ км}^3$. Скорость фильтрации, которая позволила бы заполнить этот объем водой за 1 год, равна указанному объему, деленному на сечение потока по всему периметру блока:

$$V = \frac{0,6 \text{ км}^3/\text{год}}{4 \cdot 100 \text{ км} \cdot 0,4 \text{ км}} \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ км/год} \approx 10^{-5} \text{ см/сек}.$$

Такая скорость достигается при $\Delta H/\Delta x = 10^{-3}$, т.е. перепад давления на длине $\Delta x \approx 100\text{ км}$ составит всего 100 м водяного столба, т.е. 10 кг/см^2 .

Возникший под Каспием резервуар за счет снижения давления в порах подготовил условия для усиления фильтрационных потоков из моря в пористый пласт и для образования каналов в разломных зонах, по которым и произошел сброс морской воды в подземный резервуар в 20-40 гг.

После достижения гидростатического давления началась перестройка в пористом пласте, подобно той, которая происходит в песчаных грунтах при разжижении. По мере перераспределения нагрузки на воду и уплотнения пористого слоя давление в воде возрастало и достигло к середине семидесятых годов 1000 кг/см^2 (литостатическое давление примерно в два раза выше гидростатического). Опускание дна Каспия в течение ~35 лет, связанное с уплотнением пористого слоя, воспринималось как продолжение обмеления моря. При сжатии воды в порах с 500 кг/см^2 до 1000 кг/см^2 дно Каспия должно было опуститься еще на 1 м (1940 г. - 1977 г.). Повышение давления в воде меняет направление фильтрационных потоков: вода поступает из подземного резервуара в Каспий. Судя по темпам подъема уровня моря вода доставляется к поверхности по тем же каналам, что и в 20 - 40 гг.

Если эта схема отражает положение вещей, можно предвидеть: новый стабильный уровень моря будет примерно таким же, как и в 1920 г. Повторное аномальное колебание уровня Каспия нельзя ожидать в ближайшее время, т.к. период "подготовки", связанной с погружением блоков фундамента, длится ~ 1000 лет.

Представляет определенный интерес оценка скорости передачи силового воздействия по проницаемому пласту. Пусть на глубине 5 км в пласте с проницаемостью 10^{-11} м^2 на ограниченной площади давление в насыщающей пласт воде оказалось равным литостатическому. Фильтрационный поток из области высокого давления будет вытеснять воду за пределами области, наращивая свою массу. В результате область высокого давления будет расширяться, а скорость потока падать. Обозначим расстояние пройденное фронтом повышения давления x , тогда при заданных параметрах пласта скорость фильтрации будет равна $V = 3\frac{5}{x}$, где V в км/год, а x в км. Учитывая, что увеличение плотности воды за фронтом равно в среднем $0,0125\text{ г}$, получим уравнение:

$$\frac{dx}{dt} = 80V = \frac{1200}{x}$$

Интегрируя, находим $x \approx 50\sqrt{t}$. За 25 лет фронт силового воздействия продвинется на 250 км.

Глава VI. Естественные тела

1. Динамические структуры твердых тел имеют иерархическое строение. Они распределяют механическую энергию по степеням свободы тела, направляя от крупных структурных элементов к все более мелким. Такое растекание энергии по элементам структуры каждого уровня можно рассматривать как диссипацию механической энергии тела.

На пути к атомной структуре энергетический поток проходит через ряд разномасштабных рассеивающих уровней по разветвляющимся руслам.

Структурирование твердотельных геосфер может рассматриваться одновременно как созидательный процесс самоорганизации. С точки зрения механики все иерархические структуры равноценны, т.к. имеют одинаковое назначение.

В то же время легко заметить, что каждая из них вносит свой особый вклад в разнообразие ландшафтов.

Функционирование структурированных тел в земных недрах приобретает свое целевое назначение лишь в связи с воспроизводством среды обитания. Имеющие четко выраженное назначение геологические структуры будем называть естественными телами. Важнейшей характеристикой естественных тел служит их энергомассообмен с окружающей средой.

По реакции естественных тел на воздействия техногенных факторов можно судить об опасности для среды обитания различного рода инженерной деятельности.

2. Затронем коротко суть некоторых геомеханических проблем, связанных с инженерной деятельностью человека.

Строительство плотин и заполнение водохранилищ вызывают деформацию массивов горных пород, инициируют подвижки берегов разломов, изменяют местный режим сейсмичности. Возникают проблемы устойчивости и долговечности инженерного сооружения особого рода.

Необходимо оценить, как отразилось возведение сооружения на динамической структуре массива, на его деформационном режиме: происходит адаптация природных процессов к измененному ландшафту или со временем нарастают изменения деформационного режима, которые могут вызвать перестройку структур твердых тел? Очевидно, что только в первом случае может идти речь об устойчивости и долговечности инженерного сооружения.

Немало новых геомеханических проблем возникает на территории обширных нефтегазоносных провинций в связи с интенсивной добычей углеводородов. Извлечение больших объемов нефти и газа, закачка для поддержания пластового давления больших количеств воды - все это оказывает заметное влияние на деформационные процессы в верхних слоях земной коры, отмечаются случаи техногенных землетрясений.

Отдаленные последствия такого рода вмешательства в природные процессы остаются до сих пор неясными.

Медленные взаимодействия продуктивного пласта со вмещающими горными породами в процессе эксплуатации во внимание не принимаются, и серьезным исследованиям не подвергаются.

При высоких темпах извлечения нефти половина ее остается в пласте неизвлеченной.

Негативные экологические последствия эксплуатации нефтегазовых месторождений, могут проявиться через десятилетия. Между тем, учет взаимодействия продуктивного пласта с окружающей средой обещает повышение нефтеотдачи.

3. Контролируя реакцию естественного тела при воздействии техногенных факторов, можно предупредить нарушение сложившегося равновесия в природе, которое может привести к опасным негативным последствиям.

Разумеется, не обязательно всякое нарушение равновесия в природе будет иметь негативные последствия, могут сложиться и благоприятные условия в среде обитания. Но прогноз кардинальной перестройки структуры естественного тела через нарушение природного равновесия даже в ограниченном пространстве пока представляется совершенно нереальным.

Промышленная цивилизация умножая свою мощь породила экологический кризис. Очевидно, что исправление сложившейся ситуации в материальной сфере невозможно без использования энергии естественных тел, участвующих в воспроизводстве среды обитания. Крупномасштабное строительство, горные предприятия, нефтяные и газовые промыслы по своему воздействию на природные структуры способны вмешаться в распределение потока механической энергии между естественными телами. Достаточно согласовать стратегию развития промышленных объектов и эксплуатационные ритмы с функционирующими в регионе естественными телами, чтобы исключить негативные последствия и содействовать воспроизводству устойчивых динамических структур окружающей среде.

Управление потоками механической энергии в земных недрах снимает проблему отдаленных последствий в ее прежней постановке.

Воспроизводство среды обитания должно стать целью общественного производства в новом столетии.

Вместо заключения

1. О стационарной Вселенной.

Гомологичность структур была поставлена И. Кантом на уровень основополагающих идей строения материального мира. Поражающее воображение сходство строений атома и Солнечной системы в какой-то мере можно объяснить тем, что изменение силы взаимодействия между телами с расстоянием между ними в гравитационном и электрическом полях одинаково. Возможно, однако, что иерархия структур в материальном мире есть более общее его свойство и подобие разномасштабных форм неизбежно. Издавна сходство, подобие были основой обобщения эмпирического знания.

Рассмотренные примеры структурирования материальных тел, если распространить эту идеологию на Вселенную, заставляют отдать предпочтение ее стационарному варианту, полагая, что время жизни Вселенной на порядки превосходит время существования Солнечной системы.

Пространственные структуры должны воспроизводиться на каждом иерархическом уровне с периодичностью, которая пропорциональна их размерам.

Стационарная Вселенная, объединяемая гравитационным полем, должна иметь конечные размеры. Будем считать, что одним из условий, ограничивающих ее размеры, является невозможность выхода светового излучения за ее пределы. Частицы, способные преодолеть тяготение Вселенной, должны иметь энергию $\frac{GMm}{R}$ (M , R - масса и радиус Вселенной, m - масса частицы)

Квант электромагнитного излучения имеет энергию $h\nu$ (h - постоянная Планка, ν - частота электромагнитной волны), которой соответствует гравитирующая масса $\frac{h\nu}{c^2} = m$.

Приравнивая эти энергии друг другу, получим:

$$\frac{GMm}{R} = mc^2.$$

По современным оценкам астрофизиков $M \approx 10^{56}$ г. Подставляя эту величину в формулу, находим радиус Вселенной, которая не излучает энергию за свои пределы ("черная дыра"):

$$R = \frac{GM}{c^2} \approx 10^{28} \text{ см.}$$

Это значение согласуется с общепринятым.

Все виды механического движения внутри Вселенной питаются за счет ее гравитационного потенциала. Поток энергии от крупных структур к все более мелким обеспечивает их постоянное воспроизводство и стационарность Вселенной в целом.

На низшем атомном уровне вещество обладает огромной энергоемкостью - здесь в хаотическом тепловом движении завершает свой путь поток механической энергии.

Накопившуюся тепловую энергию небесные тела в виде электромагнитного излучения высвечивают в космическое пространство. Удаляясь от центра Вселенной, фотоны теряют часть своей энергии в гравитационном поле и, выходя за пределы вещественного мира, образуют фотосферу (подобно атмосфере).

Сжатая гравитационным полем плазма в недрах звезд (сжатие продолжается по мере оттока тепловой энергии излучением) энергию механического движения частиц расходует на преобразование ядер. В ядерных реакциях рождаются всепроникающие частицы (нейтрино), которые рассеивают энергию в космическом пространстве.

Для поддержания стационарного состояния Вселенной необходимо воспроизводство частиц с массой покоя. Если ядерные реакции в недрах звезд пожирают массу покоя, то рождение массы покоя должно происходить на периферии Вселенной.

Было бы очень соблазнительно найти этот механизм воспроизводства массы покоя, но это дело других областей науки.

2. О роли биосферы в жизни Земли.

Живое вещество (понятие введено В.Н.Вернадским) биосферы представляет собой очень сложно структурированную материю. Достигнувшие высокой степени автономии бесчисленные организмы животного и растительного мира, насекомые и бактерии, социально организованные и рассеянные во взаимодействии друг с другом осуществляют стационарный процесс своего воспроизводства. Вовлекая в кругооборот вещества, поступающие из недр Земли, живые организмы формируют атмосферу - главное из условий существования биосферы.

За счет энергии солнечной радиации продуцируются сложные молекулы, которые используют свой химический потенциал для последующих превращений в живых организмах.

На протяжении всей геологической эволюции живое вещество играло активную роль, о чем свидетельствуют оставленные им следы в земной коре.

Наиболее ощутимо влияние живого вещества на химический состав атмосферы, на кругооборот молекул воды и углекислого газа, на ландшафты и климат планеты.

Мобильные структуры живого вещества приспособливаются к медленным изменениям естественных тел в земной коре и непосредственно не оказывают влияния на динамические структуры земных недр. Но влияя на режим потребления солнечной энергии и на термодинамические условия на поверхности Земли, живое вещество способно менять скорость эрозионных процессов и поверхностного массопереноса.

Биосфера демонстрирует свою способность согласовывать ритмы воспроизводства живого вещества и его структур с суточными и сезонными изменениями инсоляции.

Несомненно, живое вещество должно обладать чувствительностью к электромагнитному излучению в широком спектре частот. Среди важных для органической жизни электромагнитных колебаний должны присутствовать и собственные частоты Земли. Основной тон, определяемый временем пробега электромагнитной волны вокруг земного шара, имеет частоту ~ 10 Гц.

Косвенным подтверждением чувствительности живых организмов к этой частоте колебаний может служить то, что человек болезненно реагирует на механические сотрясения своего тела с частотами 8 - 14 Гц.

Можно высказать догадку, что живые организмы могли в процессе структурирования биосферы выбрать эту частоту для обмена информацией внутри земного пространства и с космосом.

Представляется интересным вариации электромагнитных колебаний вблизи этой частоты (или кратных ей) сопоставить с различного рода событиями в земном пространстве, космосе и человеческом обществе.

3. О натурфилософии.

Среда обитания человека представляет собой ограниченную область физического пространства, которая дополнена изобретением человеческого гения - духовной сферы, многомерной и саморазвивающейся.

На современном этапе эмпирические сведения об окружающем мире непосредственно не влияют на мировоззрение человека. В этом можно усмотреть стремление духовной сферы защититься от разрушающего воздействия частных, поверхностных сведений, наобум приноровленных ко всему.

Целостное восприятие вещественного мира путем согласования эмпирических сведений с идеями и образами духовной сферы в стремлении к внутренней гармонии - цель и содержание натурфилософии. Вещественный мир познаваем лишь в пределах среды обитания, где он представлен естественными телами, имеющими свое назначение в процессе воспроизводства окружающей человека среды. За ее пределами движение природных тел лишено направленности - оно вечно.

Разнообразие чувственного восприятия мира находит свое отражение в искусстве, постигающем законы гармонии и утверждающем нравственные нормы. Гармония в духовной сфере является высшим критерием истины и для естествознания.

В настоящем "Очерке геомеханики" представлена попытка натурфилософского осмысления ее содержания.

Литература

1. Аристотель. Собрание сочинений в 4-х т., т. 3. Москва, Мысль, 1981.
2. Толстой Л.Н. О сущности религии.
3. Вернадский В.Н. Размышления натуралиста. В 2-х кн. Москва, Наука, 1977.
4. Швейцер А. Культура и этика. Москва, Прогресс, 1973.
5. Адамар Ш. Исследование психологии процесса изобретения в области математики. Москва, Советское радио, 1970.
6. Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. Курс физики. Механика. Москва, Наука, 1971.
7. Сила тяжести и тектоника. Сб. под ред. К.А. Де Джонга и Р. Шолтена. Москва, Мир, 1976.
8. Родионов В.Н. Диссипативные структуры в геомеханике. Успехи механики, т. 2, N 4, Варшава, 1979.
9. Родионов В.Н. Максимальное землетрясение как характеристика сейсмического режима. В сб. Землетрясения Средней Азии и Казахстана 1982 г. Душанбе, Дониш, 1984.
10. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Родионов В.Н. От сейсмологии к геомеханике. Вестник АН СССР, 1983, N 1.
11. Родионов В.Н., Сизов И.А. Проявление неоднородности напряженного состояния при разрушении горных пород. Физ.-тех. проблемы разработки полезных ископаемых. Новосибирск, Наука, 1982.
12. Губкин К.Е. О поглощении упругих волн в твердой среде. Известия АН СССР, Физика Земли, N 3, 1984.
13. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. Москва, Недра, 1986.
14. Родионов В.Н., Шемякин Е.И. Горное производство: фундаментальные проблемы сохранения среды обитания. Вестник АН СССР, 1990, N 2.
15. Садовский М.А., Родионов В.Н., Беляков Г.В. О механизме возникновения кавитационного вихря. ДАН, 1992, т. 325, N 1.
16. Авсюк Ю.Н., Родионов В.Н. Приливы и геологическая эволюция. Геоэкология, 1993, N 4.
17. Родионов В.Н. Сейсмический режим и блочное строение земной коры. Геоэкология, 1995.
18. Садовский М.А., Родионов В.Н., Гончаров А.И. О кинетике дефектообразования в металлах при динамическом нагружении. ДАН, 1994, т. 334, N 5.
19. Садовский М.А., Родионов В.Н., Сизов И.А. Критерии подобия и дезинтеграции медленно деформируемых твердых тел. ДАН, 1995, т. 341, N 5.
20. Родионов В.Н., Сизов И.А. О формировании разломов в земной коре. В сб. Динамические процессы в геосферах. ИДГ РАН, Москва, 1994.
21. Адушкин В.В., Родионов В.Н. О режиме оползней на горных склонах. В сб. Динамические процессы в геосферах. ИДГ РАН, Москва, 1994.
22. Садовский М.А., Кочарян Г.Г., Родионов В.Н. О механике блочного горного массива. ДАН, 1988, т. 302, N 2.