С. И. Шерман, А. А. Бабичев

**ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ И РАЗМЕРНОСТЕЙ В ПРИЛОЖЕНИИ К ТЕКТОНИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ[[1]](#footnote-1)\***

Методам моделирования в структурной геологии и геотектонике в настоящее время придается все большее и большее значение. В обозримом будущем технические средства еще не будут в состоянии помочь человеку ’’увидеть” внутренность Земли. Становление же геологических структур и объектов, длящееся миллионы и сотни миллионов лет, человечество не может проследить в натуре. Здесь может помочь моделирование, с помощью которого можно воспроизвести, подвергнуть контролю и изучить механические, физико-химические и другие процессы. Такой путь прошли и его продолжают использовать многие науки, этот же метод с годами все шире будет использовать и геология.

Теоретической основой любого моделирования является теория подобия и размерностей — учение об условиях подобия различных физических явлений. Физические явления, процессы или системы подобны, если в сходственные моменты времени и в сходственных точках пространства значения переменных величин, характеризующих состояние одной системы, пропорциональны соответствующим величинам другой системы. Коэффициенты пропорциональности для каждой из величин называются коэффициентами подобия. В геологии при изображении ситуации на геологических картах элементарным коэффициентом геометрического подобия является масштаб. Безразмерные числа или выражения, составленные из размерных физических параметров, определяющих суть обсуждаемых физических явлений, называются критериями подобия. Иными словами, по определению С.С. Кутателадзе, "подобными являются процессы одной и той же физической природы, у которых одноименные поля безразмерных параметров геометрически тождественны” [12, с. 22].

Тектоника изучает сложные физико-химические и структурные преобразования вещества. При их моделировании пропорциональность всех характеризующих процесс параметров установить не просто. По определенным правилам, о чем будет сказано несколько ниже, составляется комбинация их критериев подобия, которые образуют критерии-комплексы подобия, или уравнения подобия. Теория подобия призвана установить и аргументировать соответствие между экспериментом и изучаемым явлением. Без доказательства соответствия не может идти и речи о переносе результатов лабораторного опыта на природу. Вчера еще можно было (в геологии, но не в физике) ограничиваться внешним сходством (геометрическим подобием) модели и объекта. Сегодня этого уже недостаточно.

При применении теории подобия в геологическом моделировании встречаются большие трудности, порой трудно преодолимые. Они обусловлены тем, что геологические объекты - многофакторные системы. Исследователи не всегда в состоянии определить соответствующий набор физических параметров, адекватно реагирующих на то или иное изменение геологической ситуации. В целом, заметим, что практически любые модели, отражающие явления природы, всегда приблизительны. Степень приближения зависит от глубины нашего знания явления и технических возможностей его моделирования. В каждом классе моделируемых явлений можно указать примерную точность воспроизведения реальной картины. В этом общая задача теории подобия и размерностей. Нахождение адекватных каждому явлению природы моделей и пределов их достоверности составляет сегодня основную цель тектонофизического моделирования.

Первые попытки использовать теорию подобия при моделировании геологических процессов принадлежат тектонистам и тектонофизикам. Как отмечал М. Хабберт [34] метод анализа размерностей при моделировании геологических процессов использовали Ж. Кониксбергер и О. Морат в 1912 г. Ссылок на эту работу практически нет и не было. Очевидно, она сильно опередила свой век в области тектонического эксперимента.

Условия подобия при экспериментах в тектонике рассмотрены Б.Л. Шнеерсоном [29], Е.H. Люстихом [13] и особенно подробно в последние двадцать лет Л.Б. Розовским [21], И.Д. Насоновым [16], А.Г. Назаровым [15], М.В. Гзовским [8], А.И. Шемендой [26], С.И. Шерманом [27, 28] и др. Очень важные сведения, которые можно использовать при разработке условий тектонических экспериментов, можно найти в публикациях Н.В. Михайлова и П.А. Ребиндера [14], Д.Н. Осокиной [17], Д.Н. Осокиной и М.В. Гзовского [18], И.К. Гавич [7], Г.И. Покровского и И.С. Федорова [19], Г.И. Баренблатта [4], А.А. Гухмана [11 ], Л.П. Филиппова [24] и др. Фундаментальными в этой области остаются исследования Л.И. Седова [22] и С.С. Кутателадзе [12].

Подобие как способ установления соответствия между физически сходными процессами и явлениями развивается и сегодня. Постоянные масштабные коэффициенты теперь уже не всегда удовлетворительно решают проблемы подобия, так как реология вещества под действием длительной нагрузки может существенно изменяться. Поэтому в качестве коэффициентов подобия могут быть использованы характеристики, меняющие свои значения с течением времени или в процессе изменения нагрузки. Такое подобие называется функциональным. Нахождение функций подобия представляет собой задачу значительно более сложную, чем поиск коэффициентов подобия и этот вопрос в данной книге рассматривать не целесообразно. К большому сожалению экспериментаторы в области тектоники не всегда уделяют достаточное внимание не только специальным, но и общим публикациям по подобию, которые можно и необходимо использовать при постановке тектонических экспериментов.

В настоящее время среди тектонистов наибольшую известность по вопросам подобия имени работы М.В. Гзовского [8]. При выборе критериев подобия М.В. Гзовский исходил прежде всего из анализа дифференциальных уравнений, характеризующих общие свойства тектонических явлений. Такие основные уравнения — это уравнения теории упругости, пластичности, движения вязкой жидкости. На их базе получен ряд критериев подобия, которые в конце концов свертываются до трех основных условий подобия: для учета энергии процессов, для моделирования на упругих средах, для моделирования на вязких средах. M B. Гзовский разработал и более тонкие детали обсуждаемого вопроса. Тем не менее сегодня многие эксперименты в тектонике проводятся без учета критериев подобия, что сильно обедняет их содержание.

Ниже мы увидим, что многие критерии-комплексы в теории подобия носят собственные имена и обозначаются первоначальными буквами по фамилиям выдающихся ученых — Рейнольдса, Нуссельта и др. Это вошло в жизнь в середине 20-х годов нашего столетия по предложению Г. Гребера [33] и ввело в анализ подобия оригинальную символику.

Моделирование было бы совершенно обесценено, если бы не давало нам возможности количественно и качественно изучать моделируемые явления, процессы и структуры и предсказывать их в натуре. Необходимо все больше и больше вовлекать исследователей в глубокий анализ физических явлений, происходящих при экспериментировании, корректно придерживаться существующих общих правил физического моделирования и соблюдать подобие по основным параметрам натурных и лабораторных процессов. Тогда более строгими станут эксперименты, увеличится их практическая и теоретическая ценность, исчезнут опирающиеся на некорректные эксперименты геотектонические построения и гипотезы.

**Принципы установления и подбора критериев подобия. Основные теоремы теории подобия и размерностей.** В теории подобия и размерностей выделяются два принципиальных подхода к подбору и выводу критериев подобия [22, 26 и др.]. Первый используется, когда исследователям точно известна физическая суть моделируемых процессов и они могут быть описаны системами физических уравнений, второй — лишь на полуколичественном уровне. Для своего применения он, естественно, требует математически корректной постановки задачи. Для вывода критериев подобия все соотношения безразмерных коэффициентов выводятся из систем уравнений (или одной системы), которые описывают моделируемый физико-механический процесс. В качестве примера, не совсем корректного, но очень наглядного для тектонического эксперимента, возьмем случай, когда моделируется складка поперечного изгиба и необходимо выяснить связь длины трещин с параметрами складки в условиях приповерхностного, т.е. хрупкого разрушения. Поскольку о величине прилагаемых сил речи нет, то физический процесс может быть описан законом Гука, выражающим зависимость между деформацией и приложенным напряжением при использовании упругих материалов:

*ϵ = σ/E*

где *ϵ* - деформация; *σ* - напряжение; *Е* - модуль Юнга. Будем считать, что чем больше деформация, тем больше трещин, а длина отдельно выбранной трещины будет пропорциональна скорости роста трещин *υ*. В действительности же рост трещин в материалах подчиняется более сложным законам. Можно записать элементарное уравнение связи длины *L* и скорости *V*:

*L = Vt.*

Эти два элементарных уравнения определяют условия моделирования. Чтобы сохранить подобие процессов, необходимо сохранить тождественность *ϵ*модели  *ϵ*натуры,т.е.

 или .

Приняв

 (коэффициент подобия напряжения) и

 (коэффициент подобия модулей упругости),

получаем, что для корректного решения задачи необходимо при моделировании приложить во столько раз меньше напряжение к модели, во сколько модуль Юнга модельного материала будет меньше аналогичной характеристики для горных пород. Лишь тогда можно говорить о том, что те параметры, которые мы фиксируем на модели, можно соотнести с природной ситуацией. И тогда по условию

,

,



и после преобразования , где С — коэффициенты подобия длины трещины, скорости и времени ее развития.

Наблюдая развитие трещины при заданных условиях на модели, можно предсказывать ее развитие в природе или решать серию других, в том числе и обратных задач. Это элементарное применение теории подобия к тектоническому эксперименту.

Но, к сожалению, природная ситуация много сложнее, а развитие даже трещины как простейшей структурной формы не так элементарно и подчиняется более сложным законам. Часто мы не знаем физических законов, лежащих в основе процесса, а если даже и знаем законы, то не всегда знаем конкретные значения исходных величин в природе. В приведенном выше случае, например, нет данных о напряжениях в земной коре, вызывающих поперечньш изгиб. Так часто бывает и в других сферах науки. Моделирование должно не только ’’копировать” явление, но и раскрывать нам сущность физических процессов, если мы их не полностью знаем.

Второй принципиальный подход к подбору критериев подобия используется тогда, когда модель охарактеризована на полуколичественном или даже кадественном уровне и мы знаем только ряд определяющих ее параметров. Разработаны правила, по которым критерии подобия можно получить и без математической постановки задачи и, следовательно, безполного знания физической сущности законов моделируемых явлений. При этом необходимо помнить, что и подобие в таком случае может быть "неполным", т.е. мы не гарантированы от того, что не упустили какого-то условия или, наоборот! не ввели "лишний" критерий подобия. Этот путь подбора критериев подобия - применение теории размерностей - требует строгого соблюдения размерностей определяющих параметров и их комбинаций в такие сочетания, которые давали бы безразмерные отношения - критерии подобия. Они должны быть таковыми, чтобы наиболее важные для нас характеристики, получаемые на модели, мы могли перенести на природный объект простым умножением соответствующего параметра модели на известный нам из соотношений подобия постоянный множитель.

Пусть в предыдущем примере мы не знаем законов деформировяния и условий развития трещин. Задача эксперимента - установить связь между линейными размерами трещин, плотностью материала и прочностными свойствами. Определяющими параметрами среды будут модуль Юнга *Е*, плотность материала *ρ*, линейные размеры *L* (это и поперечник слоя, и размеры трещин, и т.п.), напряжения *σ* и др., пока не осознанные нами. Из этих параметров можно составить безразмерную комбинацию подобия . Необходимо соблюдать равенство этого соотношения в модели и натуре. Из него следует

,

а поскольку эксперименты проводятся в реальном поле силы тяжести Земли, т.е. , то



Отсюда легко перенести результаты моделирования на природную ситуацию. Будут ли они достоверными и в какой степени? Для ответов на эти вопросы, а также для более строгой системы изложения методов выбора критериев подобия одним из двух принципиальных способов или их комбинацией рассмотрим в общей математической форме приемы подбора критериев подобия.

В том случае, когда мы располагаем системой уравнений, описывающих изучаемый процесс, т.е, когда мы в состоянии полностью формализовать нашу задачу и представить ее в форме математической модели, можно получить интересующие нас критерии прямо из этих уравнений.

Известно, что для корректного сопоставления физических величин необходимо, чтобы они были качественно одинаковы. Ж. Фурье было сформулировано правило, согласно которому все члены уравнения должны иметь одинаковую размерность. И именно отсюда следует вывод о том, что любые уравнения математической физики приводятся к безразмерному виду. Для этого необходимо все члены уравнения поделить на размерную часть одного из них.

В самом деле, пусть

 (1)

- уравнение из системы, описывающей некоторый физический процесс. Здесь *Fi* — *i*-й член уравнения, *х1*, *х2*, …, *хn* - независимые размерные параметры. Введем безразмерные характеристики , , …, , где верхний индекс “º” означает, что данное значение является масштабом, относительно которго рассматриваются физические величины. Тогда, учитывая, что , , …,  перепишем уравнение (1) :

.

Выбрав размерный комплекс одного из членов данного уравнения, например, первого, и поделив на него все члены, будем иметь:

 (2)

здесь *f* представляет собой некоторую функцию от симплексов. В остальных *k-*1 членах уравнения в качестве коэффициентов появляются множители П*i*, которые, вообще говоря, представляют собой безразмерные комплексы

 . (3)

Как уже отмечалось, подобными будут считаться процессы, у которых набор параметров попарно тождественен и попарно тождественны комплексы (3), поскольку уравнение (2) должно быть удовлетворено. Коэффициенты П*i* (принято называть критериями или числами подобия.

В самом общем случае *Fi* могут быть операторами, а параметры *х* — функциями.

Таким образом, класс явлений, описываемых функциями

 ; *j* = 1, 2, …, *n*,

может быть смоделирован в случае соблюдения всех начальных и граничных условий, а также условий подобия.

В силу того, что существуют произвол в выборе масштабов физических величин и неопределенности масштабов членов уравнений, получение критериев описанным способом не всегда можно считать окончательным. Часто требуется дополнительный анализ связи критериев подобия и физической сущности явления [6]. Тем не менее вывод критериев подобия таким методом считается наиболее корректным и точным.

Для построения критериев подобия методами теории размерностей следует руководствоваться ее принципами и теоремами. Они заставляют нас принять ряд решений: а) о выборе основных единиц измерения; б) о выборе параметров, определяющих класс явления; в) о выборе безразмерных комбинаций из этих параметров.

Перейдем к описанию алгоритма получения критериев подобия, приводя там, где это потребуется, необходимые теоремы. Прежде всего необходимо выбрать основные единицы измерения физических величин. Через них уже будут выражаться размерности всех остальных параметров эксперимента. Причем это представление будет иметь вид степенного одночлена, составленного из основных единиц измерения. Размерности, получаемые таким образом, называются производными. Их основное и очень важное свойство заключено в теореме размерностей; отношение двух численных значений какой-нибудь производной физической величины не зависит от выбора масштабов для основных единиц измерения. Ее доказательство достаточно хорошо изложено в книге Седова Л.И. [22]. Физические величины, имеющие размерность, совпадающую с какой-нибудь из основных единиц измерения, называют величинами с независимой размерностью, а остальные - с зависимой размерностью. Например, размерность длины *L*, скорости [*V*] = *L*/*Т* (где *Т* — размерность времени) и энергии [*E*] = (*ML*)*2*/*T2* (где *М* - размерность массы) - независимы. А размерность длины *L*, скорости *L*/*T* и ускорения [*a*] = *L*/*T2* - зависимы [там же]. Поэтому размерность, например, длины выражается через размерности двух других величин с помощью следующего степенного одночлена: *L* = [*V*]*2*[*a*]*-1*.

Одним из самых сложных вопросов при данном подходе является выбор параметров, определяющих класс явления. Здесь уже может потребоваться от экспериментатора не только понимание сущности явления, но еще и интуиция. При этом может возникнуть много ошибок, но в то же время проявиться творчество и изобретательность экспериментатора.

В том случае, когда выбор определяющих параметров осуществлен, наступает последний этап - поиск безразмерных комбинаций или критериев, составленных из этих параметров. Но какое количество критериев подобия будет достаточно для успешного моделирования процесса? На этот вопрос дает ответ теорема Букингэма [30] или π-теорема: из *n* параметров, среди которых имеется не более *k* параметров с независимыми размерностями (*k* ≤ *n*), нельзя составить больше *n*-*k* независимых безразмерных степенных комбинаций.

Итак, мы можем вычислить количество безразмерных комбинаций, которое необходимо и достаточно для установления подобия между экспериментом и натурой. Ясно, однако, что точность этого и других параметров зависит от правильности подбора определяющих характеристик. Следующий шаг - это непосредственное нахождение безразмерных комбинаций или критериев.

Очень часто исследователи поступают следующим образом. Из имеющихся определяющих процесс параметров "вручную" подбирают безразмерные комплексы и симплексы, стараясь при этом получать формулы, отражающие определенные физические связи и соотношения. Например, отношение сил инерции к силам вязкого трения энергии поглощенной - к энергии излученной и т.д., т.е. стремятся к тому, чтобы критерии могли иметь определенную физическую интерпретацию, хотя это и не всегда удается. При таком подходе есть риск получить критерии, представляющие собой линейно зависимые комбинации из уже имеющихся комплексов или симплексов. То есть может оказаться, что из трех полученных критериев один - скажем, второй - образуется путем умножения первого на третий.

Существует другой, более корректный, способ получения критериев подобия. С его помощью не только положительно решается изложенный вопрос, но и автоматически вычисляется количество критериев, необходимое для установления подобия. Рассмотрим его в самом общем виде [32], так же, как мы это делали при описании первого метода.

Пусть мы имеем *n* размерных параметров *х1*, *х2*, …, *хn*. Представим их размерности в виде матрицы:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | *х1* | *х2* | … | *хn* |
| M | *a1* | *a2* | … | *an* |
| L | *b1* | *b2* | … | *bn* |
| T | *c1* | *c2* | … | *cn* |

где *aj*, *bj*, *cj* — показатели степени при соответствующих значениях основных размерностей, а матрица, образованная ими, называется матрицей размерностей.

Произведение

 (4)

будет безразмерной величиной тогда и только тогда, когда показатели степени *k1*, *k2*, …, *kn* удовлетворяют системе уравнений

,

,

.

Из алгебры известно, что эта система уравнений имеет *n-r* линейно независимых решений (где *r* - ранг матрицы размерностей) и что любое решение системы *k1*, *k2*, …, *kn* можно представить в виде линейной комбинации этих *n-r* линейно независимых решений. А это означает, что независимыми по отношению друг к другу являются *n-r* безразмерных величин, образованных из произведений (4), при условии, что система полная. Таким образом, нам становится известным количество необходимых для моделирования критериев.

Ввиду того, что неизвестных, как правило, больше, чем уравнений, система имеет бесконечное множество решений. Но мы вольны выбирать из этого множества только те *n-r* решений, которые при подстановке в (4) дают комплексы, интерпретируемые физически, если не все, то хотя бы часть из них. Как видно, мы сразу получаем требуемое количество критериев (4) и при том гарантирована их независимость.

Очень кратко и в самых общих чертах мы описали основные принципы и теоремы теории подобия и размерностей. Естественно, что этим теория не исчерпывается. Достаточно сказать, что в последнее время часто появляются работы, затрагивающие все более глубокие аспекты теории подобия вообще и область механики и физики разрушения, в частности. Ярким примером такого исследования является установление механиками [5] различных стадий автомодельности в течение процесса разрушения. Оказывается, процесс разрушения различных материалов подобен сам себе (автомоделей) лишь в определенные периоды стадии разрушения. Затем происходит качественная перестройка структуры процесса, и наступает другая автомодельная стадия, не подобная предыдущей. В тектонических экспериментах такое же поведение испытываемого материала заставляет исследователей учитывать стадийность не только для подбора модельного материала, но и для анализа подобия на каждой стадии разрушения [3].

Трудности, которые встречаются при использовании теории подобия, порой кажутся непреодолимыми. Именно поэтому в геологии, в науке, изучающей столь сложные и многофакторные процессы, наибольшей популярностью пользуется второй метод получения критериев подобия. Лишь в очень редких случаях возможно применение первого метода, да и то при решении очень частных задач. В подавляющем же большинстве случаев мы не имеем полного математического описания явления. Поэтому в экспериментальной тектонике, тектонофизике чаще используются комбинации двух методов выборов критериев подобия, с большим приоритетом второму способу. В приводимой в конце статьи таблице даны основные соотношения критериев подобия. Большинство из них подобрано вторым способом или комбинацией двух способов.

**Принципиальные типы моделирования в тектонофизике и основные критерии подобия.** Моделирование в тектонофизике связано, как правило, с изучением тектонических структур и процессов. Среди видов моделирования преобладает физическое, которое объединяет несколько методов. Его характерной особенностью является то, что задается источник сил, который через штамп, жидкость или массовым приложением (центрифуга) воздействует на модельное вещество.

Для систематизации критериев подобия и облегчения пользования ими на практике стала очевидной необходимость объединения тектонофизических экспериментов по группам в зависимости от характера приложения нагрузок. По этому критерию все физические эксперименты мы разделяем на два больших класса. Первый соответствует случаю, когда

 , (5)

где под *Р* понимается действующая на модель внешняя нагрузка во времени *t*; такое нагружение называется статическим. Ко второму классу относятся эксперименты, в

, (6)

а нагружение называется динамическим. Внутри этих двух классов существует более дробная классификация по способам задания внешних нагрузок и используемым модельным материалам.

Статическое нагружение. Осуществление данного типа нагружения задается требованием выполнения условия (5). Это означает, что во время проведения эксперимента действующая на модель внешняя нагрузка должна оставаться неизменной Эксперименты данного типа соответствуют следующим реальным обстановкам. Допустим, что перед нами поставлена задача изучения разрушения двух взаимодействующих литосферных плит, одна из которых движется относительно другой. Мы предполагаем, что источником движения является конвектирующая астеносфера. Передача энергии от астеносферы к литосферной плите происходит посредством вязкого трения верхних слоев астеносферы о нижнюю границу литосферной плиты. Далее считаем, что коэффициент вязкого трения и площадь взаимодействия источника и приемника не изменяются в течение очень длительного времени. При этом, конечно, предполагается постоянство скорости движения вещества астеносферы вблизи нижней границы плиты

Другим примером тектонической активности под действием постоянной внешней нагрузки может служить процесс деформирования и разрушения земной коры под действием гравитационных сил. При этом, как правило, считается, что вовлеченные в деформацию массы имеют толщину, недостаточную для того, чтобы градиент напряженности гравитационного поля можно было бы принимать во внимание.

Существуют еще и другие механизмы деформации земной коры в условиях постоянно действующей внешней силы, но мы подробнее остановимся на последнем. Он послужит нам конкретными примером применения теории подобия в уже осуществленных экспериментах.

*Центрифугирование*. Хорошо известны опыты по моделирования образования складчатых структур, а также разрывных деформаций при помощи центрифуги [10, 20, 31, 35 и т.д.].

Основным преимуществом центрифуги является возможность использования массовых сил при деформировании модельного материала. В экспериментах, в которых деформация воспроизводится при помощи штампов, исследователь лишен такой возможности, так как нагружение задается всегда на какой-либо из границ модели. Заставить можель деформироваться под действием собственного веса без центрифуги в принципе, возможно путем подбора соответствующих малопрочных эквивалентных материалов, но тогда возникают трудности в формировании модели. Кроме того, деформация таких материалов происходит в основном за счет вязкопластичного течения с образованием малого количества разрывов.

В основе метода центрифугирования лежит принцип, согласно которому в моделях центробежная сила играет ту же роль, что и сила тяжести в геологии. Но поскольку ускорение мы можем увеличивать в несколько тысяч раз, то и модельные материалы можно использовать более прочные, чем при моделировании с помощью штампов, но менее прочные, чем горные породы, что позволяет значительно сократить время развития процессов и облегчает изготовление моделей.

Перейдем к рассмотрению критериев подобия модели натуре в экспериментах на центрифуге. Как уже упоминалось в начале главы, для сложных геологических процессов мы не имеем чаще всего точного математического описания, поэтому воспользуемся вторым принципом вывода критериев подобия для всей группы тектонических экспериментов на центрифуге. А затем сравним эти критерии с исследованиями X. Рам-берга [20] и критериями, выведенными на базе физических законов центрифугирования, Конечно, при подборе критериев подобия по теории размерностей их набор и набор физических характеристик не может претендовать на окончательное решение проблемы. Ясно, что при изучении конкретных достаточно узких задач могут быть учтены характеристики, не вошедшие в наше рассмотрение. Тем не менее для иллюстрации метода приведем здесь свой анализ.

Итак, выпишем все физические характеристики, которые определяют изучаемый процесс:

*υ*, *L*, *ρ*, *η*, *g*, *σ*, *P*, *ɛ*

где *υ* — скорость; *L* — линейный размер; *ρ* — плотность; *η* — вязкость; *g* — ускорение свободного падения; *σ* — напряжение или прочность на сдвиг; *P* — давление; *ɛ* — относительная деформация.

Исходя из основных теорем теории подобия, не будем включать в матрицу размерностей безразмерные характеристики, но всегда будем стараться соблюдать их равенство в модели и в натуре, так как они сами по себе являются критериями подобия. По тем же соображениям мы можем не перечислять характеристики с одинаковыми размерностями, а использовать при выводе критериев подобия лишь одну из них. При этом всегда будем помнить о том, что в формулу вместо одной физической характеристики может входить другая, одноименная по размерности величина.

Составляем матрицу размерностей [32]: в вертикальной графе даем наименования основных единиц измерения, которые мы используем; по горизонтали приводим выбранные определяющие параметры (каждому из них соответствует показатель степени *ki*, где *i* = 1, 2, ..., 6 и т.д.). Остается в подготовленные клетки поставить показатель степени, которую имеет основная единица измерения в данном определяющем параметре. Если в определяющий параметр данная единица измерения не входит, то показатель степени принимается равным нулю (табл. 1).

Отсюда выводим систему уравнений

 (7)

где *ki* соответствует показателям степеней при физических характеристиках (см табл. 1).

Поскольку можно найти определитель третьего порядка для этой матрицы, не равный нулю, то ранг матрицы равен 3. Поэтому число независимых безразмерных величин, необходимое для образования полной системы, должно быть *n-r*, т.е. на три меньше общего числа переменных. Количество переменных у нас равно шести, следовательно, для подобия достаточно получить три критерия. Наша система содержит шесть переменных в трех уравнениях. Значит для нахождения решений требуется задать самим значения трех параметров.

Таблица 1

Матрица размерностей

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Определяющий параметр | *η* | *υ* | *g* | *σ* или *P* | *ρ* | *L* |
| Показатель степени | *k1* | *k2* | *k3* | *k4* | *k5* | *k6* |
| [*M*] | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| [*L*] | -1 | 1 | 1 | -1 | -3 | 1 |
| [*T*] | -1 | -1 | -2 | -2 | 0 | 0 |

Пусть ими будут *k4*, *k5* и *k6*, хотя выбор может быть и другим. Тогда, решая систему (7) относительно переменных *k1*, *k2* и *k3*, будем иметь

,

, (8)

.

Из алгебры известно, что для систем вида (7) существует бесконечное множество решений. Но мы выберем для себя только три линейно независимых решения, которые необходимы для установления подобия в нашей задаче. При их получении нужно позаботиться лишь о том, чтобы задаваемые нами кажlый раз значения *k4*, *k5* и *k6* были бы линейно независимы.

Пусть *k4* = *k5* = *k6* = 1, тогда *k1* = -2, *k2* = 2 и *k3* = -1. Подставим эти значения в (4), имея в виду параметры нашей задачи. Получим

.

Взяв следующую группу значений *k4*, *k5* и *k6*, получим еще один критерий подобия и т.д. Недостатком здесь является то, что по полученным критериям часто бывает неясно, какой физический смысл в них заложен. Однако, подбирая соответствующие значения наших независимых переменных *k4*, *k5* и *k6*, можно получить критерии подобия, отражающие отношение определенных сил в модели. Например, при *k4* = -1; *k5* = 1; *k6* = 1 получим

 , (10)

или в соотношении масштабных коэффициентов

. (10а)

Далее, при соответствующих *k4*, *k5* и *k6* будем иметь

, (11)

, (12)

или

 и (11а)

. (12а)

Теперь мы видим, что выражения (10)—(12) представляют собой соответственно отношения сил тяжести к силам давления, сил давления к силам вязкости и сил инерции к силам тяжести. Последние два критерия подобия очень часто применяются в гидродинамике и носят названия ’’число Стокса” и ’’число Фруда”. Интересно, что точно такие же критерии подобия приводит X. Рамберг, но получает он их из чисто качественных соображений.

Критерии подобия (9), (10), (11) либо (10), (11), (12) при условии выполнения подобия по деформациям *ϵ* являются достаточными для моделирования на центрифуге тех процессов, которые определяются набором параметров, использованным нами. Однако этот набор не может претендовать на полноту, так как для многих процессов важно знать соотношение времени (длительности) процессов и линейных размеров структур. Но как только мы вводим в рассмотрение время, мы обязаны учесть связь между масштабными коэффициентами времени и линейными размерами.

X. Рамберг в своих опытах отказался от условия , описывающего зависимость между размерами моделируемых объектов и временем деформирования при *Cg* = 1, Он считал, что поскольку ускорение в тектонических процессах пренебрежимо мало (кроме землетрясений), в экспериментах величины *L* и *t* можно принять независимыми. Однако это не совсем корректно. Время в геотектонике тесно коррелирует с развитием геологических структур и их размерами. Если пренебречь этим и следовать только рекомендациям X. Рамберга, то из эксперимента можно извлечь лишь качественную картину, что не соответствует требованиям сегодняшнего дня[[2]](#footnote-2)1.

Проведем анализ действия массовой силы на модель в центрифуге. В этом случае сила давления *F* определяется из развиваемого ускорения *а* и равна центробежной силе

, (13)

где  — объем модели.

Подобие процессов будет соблюдено, если учитывается, что

.

Если при моделировании применяются хрупкие материалы, деформация которых подчиняется закону Гука, то основным уравнением подобия явится отношение (10), где *Р* заменено на модуль Юнга *Е*, из преобразований которого следует основное со отношение коэффициентов подобия

. (15)

Из (15) видно, что можно оценивать размеры структур, получаемые при моделировании, и переносить их на природные процессы.

На центрифуге хорошо моделируются процессы гравитационного тектогенеза. Здесь, если строго соблюдать критерии подобия, можно добиться и количественной оценки структурных параметров.

Некоторые процессы, связанные с всплыванием соляных куполов или гранитных массивов и часто обсуждаемые в геотектонике, можно оценивать через уравнение Навье-Стокса и моделировать на центрифуге. Здесь мы не рассматриваем более подробно этот процесс.

Без учета параметра времени для оценки соотношений размеров модели и натуры можно использовать критерий, приводимый И.Д. Насоновым [16]:

, (16)

где *а* - полное ускорение какой-либо точки модели на центрифуге. Из (16) следует, что на модель должны действовать центробежные силы, превосходящие силу тяжести во столько раз, во сколько раз модель меньше исследуемой области в натуре.

Тектонистами еще не полностью раскрыты возможности метода центрифугирования. Он может, например, применяться для оценки тектонических сил, времени и скорости развития отдельных тектонических структур. Представляется целесообразной комбинация этого метода со способами динамического нагружения для постановки экспериментов по деформациям в глубоких частях литосферы.

Динамическое нагружение. В том случае, когда выполняется условие (6), мы имеем дело с изменяющейся во времени внешней нагрузкой. Такая ситуация, по-видимому, чаще всего реализуется в природе. Метод динамического нагружения применяется для изучения механизма образования структур, оперяющих трещин, трубок взрыва, сопровождающих их эффектов и полей напряжений, а также при моделировании более сложных геодинамических процессов (например, поддвига литосферных плит). При этом предполагается, как правило, что мощность источника движения настолько велика, что вне зависимости от реакции участвующих в движении объектов отсутствует обратная связь ’’объект—источник”.

Моделируемые процессы сложны по своей физической природе. В основе их может лежать упругая или пластическая деформация горных пород, а чаще — более сложная в координате времени деформация, математическое описание которой трудно сделать одним или несколькими уравнениями (или даже практически невозможно из-за неопределенности некоторых параметров). Помимо этого, возникают трудности в решении уравнении, описывающих деформацию среды, так как приходится интегрировать систему нелинейных уравнений второго порядка в частных производных при соответствующих начальных и граничных условиях. С математической стороны проблема сложна, не всегда удается получить ее точное решение. Поэтому установление подобия физических процессов в натуре и эксперименте затруднено.

Большинство геотектонических процессов, для изучения которых привлекается метод динамического нагружения, описывается условиями динамического (механического) подобия. Для их выполнения необходимо соблюсти прежде всего геометрическое подобие, что является обязательной предпосылкой подобия всех физических явлений

; (17)

; (18)

; (19)

; (20)

где *L* - линейные размеры сходственных участков модели и объектов; *V* - скорости движения и *F* и *Р* - сила и вес (давление) в сходственных точках в модели и объекте; *С* –коэффициенты подобия; *CL*, *CF*, *CV*, *СP* - главные критерии-симплексы (равенства (17) —(20)), определяющие подобие при динамическом нагружении.

Поскольку в кинематике рассматриваются процессы движения, то обязательно необходима и единица времени *t*, которая в сходственных точках также должна быть пропорциональна

. (21)

Уравнения (17) — (21) образуют основные критерии-симплексы. Они практически соблюдаются в тектонических экспериментах, но этого явно недостаточно. Более полное подобие достигается при соблюдении комплекса физически взаимосвязанных параметров.

Критерии-комплексы можно оценить только после анализа моделируемого физического процесса. В наиболее общем виде моделируемый физический процесс при динамическом нагружении будет описьваться основными уравнениями механики, в том числе вторым законом Ньютона

; (22)

; (23)

; (24)

где *F* —сила; *P* —вес; *а* — ускорение; *g* — ускорение, свободного падения; *U* — кинетическая энергия; *m* — масса; *V* — скорость.

Поскольку силы и энергия часто не учитываются в экспериментах, и в анализе используются только результаты их действия безотносительно к способу приложения сил и их величинам, то физический процесс может быть описан законом Гука, выражающим зависимость между деформацией и приложенным напряжением при использовании упругих материалов

 *ɛ = σ/E*, (25)

или уравнениями Коши, выражающими зависимость между деформациями и малыми удлинениями

*ɛ = /L*

где *Е* — модуль Юнга; ** — удлинение.

Уравнения (22)-(24) характеризуют физический процесс в наиболее общем виде и не учитывают свойств материалов, линейные размеры моделируемого объекта и время деформирования или действия сил. Уравнение (25) учитывает упругие свойства среды, но не учитывает линейные размеры объекта и длительность процесса, а уравнение (26) используется только при очень малых деформациях, т.е. практически при упругом деформировании.

Физический процесс при вязком деформировании описывается равенством

**,**  (27)

связывающее касательные напряжения *τ* со скоростью относитель­ной деформации  и вязкостью материала *η*.

Уравнения (22) — (27) практически охватывают все случаи моделирования в геотектонике методом динамического нагружения. Но только на их базе нельзя вывести основные критерии подобия, так как ни в одно из них совместно не входят характерные размеры модели и время эксперимента, что особенно важно при практическом использовании результатов моделирования и переносе выводов на натурные условия. Поэтому при моделировании с использованием хрупких и упругих материалов для выводов критериев подобия необходимо воспользоваться теорией размерностей.

Систему определяющих параметров при моделировании методом динамического нагружения образуют: прочность на сдвиг (*σ*), модуль Юнга (*Е*), плотность (*ρ*), удельный вес (*γ*), линейный размер тела или расстояние (*L*), ускорение силы тяжести (*g*), сила (*F*), время (*t*), скорость (*V*). Названные параметры будем считать главными и полагать наличие между ними функциональной связи. По ним можно составить матрицу размерностей и определить критерии подобия для динамического моделирования. Но мы не будем приводить эти расчеты здесь, так как они были уже показаны нами ранее.

Базой для динамически подобных состояний станут условия:

, (28)

, (29)

, (29а)

, (30)

, (31)

. (32)

Уравнения (31) и (32) – соответственно критерии Струхаля и фруда, хорошо изветсные в физике.

Критерии подобия заключаются в равенстве этих параметров на модели и в натуре. При выполнении этих условий все деформации будут подобными. Несложные преобразования позволят получить группу уравнений коэффициентов подобия (табл. 2), рекомендуемых для использования при моделировании методом динамического нагружения. Наибольший практический интерес представляет критерий-комплекс *CL=Ct ·CV*, связывающий линейные размеры со скоростью и временем течения процесса (деформированием и т.п.). Это преобразование критерия Струхаля, чаще применяемого для связи частоты (*ω*), линейной скорости (*V*) и пути (*L*) :

 (33)

Л.Б. Розовский [21] рекомендует использовать этот критерий (или критерий гомо-хронности) для моделирования подобия времени протекания геологических явлений. Последнее справедливо, если геологические процессы связаны с вращательными или колебательными движениями. Более удобно применять число Фруда (32), которое после преобразований можно записать как

 (34)

и преобразовать в уравнение коэффициентов подобия

 (35)

приведенное в таблице.

Для моделей в гравитационном поле Земли . По этому критерию можно моделировать развитие структур во времени, или, наоборот, оценивать длительность развития структур по их размерам. Как правило, в тектонических экспериментах число Фруда невелико и означает, что сила инерции незначительна по сравнению с силой тяжести. Это очень важно, так как в моделях силы инерции должны быть чрезвычайно малыми.

Большая степень подобия при тектонических экспериментах достигается при моделировании на вязких материалах. Физический процесс описывается уравнением (27), из которого после преобразований можно получить группу уравнений коэффициентов подобия (см. табл. 2). Одно из них соответствует уравнению , (по М.В. Гзов-скому [8]). В основное уравнение (27) не входят характерные размеры моделируемых объектов.

Воспользуемся теорией подобия и размерностей и определим систему главных параметров, отражающих основные свойства пластичных материалов. К ним прежде всего будут относится вяз­кость (*η*), время (*t*), размеры объекта (*L*), ускорение свободного падения (*g*), плотность (*ρ*), скорость деформации (*ɛ*), напряжения (*σ*) и скорость потока (*V*). Базой для динамических подобных состояний будут уравнения

, (36)

, (37)

, (38)

. (39)

Таблица 2

Основные уравнения и критерии подобия при физическом моделировании в геотектонике

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Вид нагружения | Способ реализации нагрузок | Основное свойство эквивалентных материалов | Критерии – комплексы по анализу размерностей или соответствующим физическим уравнениям процесса | Требуемые соотношения коэффициентов подобия при моделировании |
|  | Фотоупругость | Пластичные анизотропные | ; ; ;;  | ; ; ; ;  |
| Статическое | Центрифугированные | Пластичные | ; ;  | ; ;; |
| Хрупкие и упругие | ; ; ; ; ; ;  | ; ;; ; ; ;; |
| Динамическое | посредством штампов | Пластичные | ; ; ; ;;; | ;;;;; ;; |
| Хрупкие | ; ; ;; ;;; ;; | ; ; ; ;;; |

Наиболее емким является уравнение (37), которое охватывает главные определяющие параметры, характеризующие моделируемый процесс. Преобразования (37) приводят к следующему соотношению коэффициентов подобия: . (40).

Уравнение (40) является основным критерием-комплексом подобия при моделировании тектонических процессов [27]. При моделировании без применения ускоряющих устройств, когда *Cg* = 1, уравнение (40) упрощается:

.

Если учесть, что при моделировании геотектонических процессов и структур *Сη* и *Сt* оцениваются числами 6-12 порядков, то можно пренебречь *Сρ*, поскольку плотность эквивалентных материалов изменяется в тех же пределах, что и плотность горных пород, или, в крайнем случае, на один порядок ниже. Тогда



Последний критерий-комплекс необходимо соблюдать обязательно. Попутно заметим, что М.А. Гончаров [9] успешно использовал его при моделировании и оценке параметров адвекции. При моделировании же на вязких материалах произвольно выбирать масштабы модели и время длительности эксперимента нельзя.

Уравнение (38) является одной из форм представления числа Рейнольдса Re. При моделировании движения тела в несжимаемой вязкой жидкости число Re отражает ламинарный или турбулентный характер потока. Высокое значение числа Re свидетельствует о турбулентности потока. В экспериментах на вязких материалах число Re получается очень низким (порядка 10-9-10-12), что свидетельствует об исключительно ламинарно-спокойном течении материала, а также о том, что сила инерции мала по сравнению с силой вязкого трения. В таблице даны другие уравнения коэффициентов подобия, которые рекомендуется применять при моделировании методом динамического нагружения. К сожалению, эти хорошо известные вещи мы не всегда используем при анализе наших экспериментов.

В заключение отметим, что самостоятельный интерес представляет собой изучение изменения напряженного состояния в условиях динамического нагружения и изучение изменения скоростей деформации в условиях статического нагружения.

Моделирование на оптически-активных материалах. Рассмотрение экспериментов на оптически-активных материалах нами выделено из-за специфики условий их проведения и довольно слабой разработанности с точки зрения теории подобия. Но применим наш подход и для этого случая.

Метод фотоупругости в тектонических экспериментах имеет узкоцелевую задачу по изучению напряжений в складчатых и разрывных структурах и окружающих их зонах. Физическая основа метода — эффект появления в изотропных телах оптической анизотропии, пропорциональной внутренним напряжениям, возникающим под действием внешних сил. Такое соотношение возникает в телах, при деформации которых фиксируется пропорциональность между напряжением и деформацией, т.е. деформируемые тела описываются законом Гука или уравнениями Коши, определяющими связь между малыми деформациями и перемещениями (уравнение 26 [1]). Уже этим фактом накладываются определенные ограничения на возможность распространения результатов моделирования на геологические процессы и медленные тектонические деформации, отвечающие пластическому или квазипластическому течению[[3]](#footnote-3)1.

Оптический метод не фиксирует прямо главные нормальные напряжения: в оптическом эффекте проявляется разность между ними, т.е. максимальные касательные напряжения[[4]](#footnote-4)2:

 . (41)

Изотропные тела под нагрузкой обнаруживают и свойства двойного лучепреломления. Под действием напряжений создаются деформации, которые приводят материал к оптической анизотропии.

При этом лучи в напряженной пластинке распространяются с различными скоростями в соответствии с величинами *σ1* и *σ2*, что приводит к оптическому сдвигу фаз и линейной разности хода. Разность хода в любой точке пропорциональна разности главных напряжений:

 или , (43)

где *Г* — разность хода, *с* — постоянная материала или оптический коэффициент напряжений, *d* — толщина пластинки.

Зная толщину исследуемой пластинки-среза, оптическую постоянную *с* и оценив разность хода *Г* по различию цветовой окраски и таблице соотношений цвета и длины волн, можно найти *τ*max. Приняв во внимание физическую природу метода фотоупругости, оценим общие критерии подобия. Поскольку моделируются напряжения в упругом теле и так как они исчезают со снятием нагрузки, оптическое моделирование может быть применено для оценки напряжений, связанных с упругой стадией деформации. Это инициальные стадии развития геотектонических процессов.

Условия инвариантности физических процессов в модели и объекте вытекают либо из закона Гука (26) о пропорциональности деформаций приложенным напряжениям, либо из уравнений Коши (27), описывающих пропорциональность деформации малым перемещениям. Во всех случаях должна соблюдаться пропорциональность сил (20). Коэффициенты Пуассона в натуре и эквивалентном материале должны быть одинаковы. Связь деформирующих сил, напряжений и линейных размеров оценивается теорией размерностей. Определяющие параметры — это величины *L*, *σ*, *Е*, *F*. Из размерных переменных и параметров следует три независимых степенных комплекса, которые и являются критериями-комплексами подобия. Из них следуют четыре основные уравнения коэффициентов подобия (см. табл. 2).

Через коэффициенты подобия геометрических форм можно перейти к количественной оценке площадных границ аномальных по сравнению с окружающей средой полей напряжений. При анализе результатов моделирования методом фотоупругости необходимо указывать, что выводы отражают ситуацию только упругой характеристики деформации.

Вот почему на повестку дня ставятся задачи моделирования стадий развития структур и прослеживания эволюции полей напряжений тензометрическим методом. Он позволит получить объемную характеристику поля напряжений в модели в различные временные периоды ее развития. Известные сегодня схемы полей напряжений в складках и разрывах отражают с геологической точки зрения мгновенную картину, характерную для инициальной стадии развития cтруктур.

**Модельные материалы**. Одним из важнейших в экспериментах по тектонофизике и в моделировании вообще является вопрос о выборе модельного материала. Того требуют критерии подобия. Совершенно естественно, что большинство горных пород не может быть использовано для этой цели. В большинстве случаев свойства материала, участвующего в эксперименте, определяют не только технические средства реализации опыта, но и его конечный результат. Для того, чтобы правильно имитировать эволюцию структуры, модельные материалы (их еще называют эквивалентными) должны обладать рядом свойств, отличных от характеристик изучаемого объекта. В геологическом эксперименте такие требования вполне оправданы, так как под действием колоссальных нагрузок в течение тысяч лет горные порода проявляют свойства пластичности и даже вязкого течения при обычных температурах, что невозможно наблюдать в лаборатории при тех же временных интервалах и давлениях, которыми располагает экспериментатор. Мы понимаем, что огромная доля нагрузок, приходящихся на единицу объема горной массы, имеет гравитационное происхождение. И, следовательно, часть деформации (иногда и все сто процентов) обусловлена собственным весом породы. Отсюда возникает требование низкой прочности модельного материала для того, чтобы он мог под действием силы тяжести деформироваться, растекаться, погружаться и даже разрываться [20].

Низкая прочность эквивалентных материалов создает много проблем при изготовлении моделей. Модельный материал буквально протекает между пальцами. Увеличивать же прочность мы можем, лишь увеличивая геометрические размеры. Однако известно, что в геометрически подобных структурах из идентичных материалов вес возрастает пропорционально кубу линейного размера, тогда как прочность увеличивается как квадрат линейного размера. Поэтому для эксперимента применяются, как правило, отличные от горных пород материалы, а для моделирования структур, развивающихся в поле силы тяжести, используют центрифуги.

Очень хороший пример применения теории подобия для подбора эквивалентного материала представляют собой опыты по моделированию поддвига литосферных плит [25], Из-за большой протяженности моделируемого объекта (порядка нескольких тысяч километров) и очень маленьких .размеров экспериментальной установки (несколько сантиметров) пришлось использовать эквивалентный материал с довольно низким значением прочности при следующих условиях подобия

; ; ; ; ,

где *τS*, *Е*, *Н* и *L* — соответственно предел текучести на сдвиг, модуль упругости, мощность и длина литосферной плиты; *g* - ускорение свободного падения; Ψ - угол падения зоны Заварицкого—Беньофа. Для принятых характерных значений физических величин оригинала (*τS* ~ 109 дин/см2, *Н* = 7 · 106 см, *ρ =* 3,3 г/см3) и модели (*Н* = 5 см, р = *ρ* г/ см3) после несложных вычислений получаем, что *τS* должно быть порядка 100 дин/ см2. Такой материал растекается под действием собственного веса. Понятно, что изготавливать из него образцы модели, помещать их в установку и извлекать из нее почти невозможно. Выход был в том, что к материалу предъявили еще одно требование: *τS* должно было меняться в зависимости от температуры. И такой материал был разработан [25]. Его основу составлял вазелин, а также сплавы минеральных масел (вазелинового и парфюмерного) с твердыми углеводородами (церезинами и парафином). При относительно низких температурах эти компаунды являются хрупкими веществами.

Рассмотренный пример подбора модельного материала представляет собой хорошую иллюстрацию того, с какими трудностями приходится сталкиваться экспериментатору во время подготовки и проведения экспериментов и тектонических опытов. В данном случае их источником была статическая постановка задачи, где определяющую роль играет сила тяжести. Но, как уже отмечалось, при использовании центрифуги для решения статических задач возможно применение гораздо более прочных материалов, даже при меньших размерах моделей. Нам известны примеры применения в качестве эквивалентного материала в центрифугируемых моделях пластилина, смеси зубного порошка с глицерином [10], сапожного вара, силиконовой замазки [20] и т.д. Основным критерием для подбора всех этих материалов в той или иной форме всегда служило отношение сил тяжести к напряжениям: , т.е. выполнение соотношения .

А теперь обратим внимание на другой не менее широкий класс задач, в которых критические напряжения создаются не под действием собственного веса пород или другой статической нагрузки, а динамически - в результате перемещения соседних блоков либо мощных течений. Здесь значение упомянутого критерия будет ничтожным, и мы им можем пренебречь без большого ущерба для подобия. Зато прочность материала для моделей становится достаточно высокой, что упрощает работу с образцами. Для решения методом моделирования таких задач, как образование складок небольших размеров, структур будинажа и т.п., нет необходимости, чтобы отношение гравитационных сил в модели и прототипе было равно отношению сил, приложенных к границам модели и к границам природной системы [20]. Однако здесь возникают другие требования, которые в конечном итоге сильно ограничивают выбор модельного вещества, хотя он все же остается достаточно широким. Для перечисленных процессов, а также для изучения формирования и развития зон трещиноватости, образующихся в природе в условиях длительно действующих и изменяющихся во времени нагрузок, очень важно учитывать свойства вязкости (текучести), пластичности и даже иногда упругости вещества. То есть материал должен иметь весьма сложное сочетание реологических свойств, и оно (сочетание) должно адекватно отражать поведение модели при динамически подобном нагружении. Основными критериями здесь могут служить следующие ; ; ;  и др. Классическим модельным материалом в таких экспериментах можно назвать водные суспензии и пасты глины. КЖ. Семинский [23] показал, что пасты из бурой глины в определенном интервале влажности представляют собой малопрочную твердообразную структурированную систему, обладающую упруго-пластическими свойствами. Для оценки правомерности использования глинистых паст в качестве эквивалентого материала при изучении длительных процессов структурообразования в коре и литосфере в целом было проведено сравнение реологического поведения объекта моделирования (литосферы) и модели (глинистой пасты). Таким образом, получено еще одно доказательство того, что глинистые пасты при нормальных лабораторных условиях обладают теми же реологическими свойствами, что и литосфера в тектонических процессах большой длительности. Основным преимуществом этого материала перед другими является способность изменять вязкость (на несколько порядков!) в зависимости от влажности. Этот материал использовали в своих опытах М.В. Гзовский, А.В. Михайлова, А.Н. Бокун, С.И. Шерман, С.А. Борняков и др,[[5]](#footnote-5)3. Вообще попытки поиска наиболее подходящего материала для моделирования сложных геотектонических процессов делаются уже давно, и накоплен уже немалый опыт использования различных варов, смол и других реологических сред.

Особо выделяются материалы для изучения напряженно-деформированного состояния поляризационно-оптическим методом [1, 17 и др.], исследуется в основном модель, подвергнутая статическому нагружению. При исследованиях методом фотоупругости модели изготавливаются из упругих оптически чувствительных материалов. Набор критериев подобия для оптического моделирования существенно зависит от конкретной задачи, но мы, как и раньше, приведем группу наиболее часто используемых при данном способе изучения деформаций и напряжений:,, где *Р* — сосредоточенная сила. В качестве модельного материала чаще всего и (пользуется желатиновый студень, упругие свойства которого сильно зависят от концентрации желатина в воде. Основным недостатком является то, что одну и ту же модель нельзя использовать слишком долго, так как она меняет свои упругие свойства. В этом отношении гораздо лучшим материалом может служить ацетилцеллюлоза, но она имеет меньшую оптическую прозрачность и обладает неприятным запахом,

Подводя итог, хочется сказать о том, что круг задач экспериментальной тектоники настолько широк и спектр материалов так разнообразен, что даже простое перечисление того и другого могло бы занять больше места, чем отведено для всей статьи. Мы попытались лишь осветить некоторые трудности, возникающие на пути использования теории подобия при подборе эквивалентных материалов, и показать принципы, которыми следует руководствоваться при решении этой проблемы. Однако все эти трудности с лихвой окупаются, когда экспериментатор получает возможность перенесения результатов моделирования на природную ситуацию.

Нет сомнения в том, что роль и значение эксперимента в геотектонике и особенно в тектонофизике будет неуклонно возрастать. Эксперимент будет по-прежнему призван для решения прямых задач: по заданным начальным формам, свойствам материала и условиям приложения нагрузки оценивать динамику развития и механизм образования комплексных геологических структур, иными словами, вносить дополнительные штрихи с понимание тектонического процесса. В настоящее время эксперимент призван решать и более конкретные, а главное прогнозные задачи; он должен давать нам ключ к прогнозированию ряда геолого-геофизических явлений на количественной основе. Последнее может быть выполнено только на базе хорошо поставленной теоретической основы экспериментальных методов вообще — теории подобия и размерностей. И сегодня наша задача не столько развивать эту теорию в приложении к тектоническому эксперименту (это всегда важный раздел нашей работы), сколько добиваться более широкого и строгого применения этой теории в ведущемся в настоящее время громадном количестве экспериментальных работ. Задача нелегкая, так как требует серьезной внутренней перестройки взглядов исполнителей работ. Иначе, работая только на геометрическом сходстве структурных планов модели и объекта в натуре, мы не получаем ни полной информации от моделирования, ни, и это основное, твердой уверенности подобия моделируемых процессов.

В то же время всегда необходимо помнить о том, что модель всегда будет моделью — в ней никогда не будет строгого подобия реальной картине. В окружающей нас действительности нигде и никогда нельзя все знать и тем более выполнить в модели. Всегда в науке остается место для более глубокого познания и для более корректных уточнений уже существующего уровня знаний по конкретному вопросу.

Много проблем предстоит решить по применению теории подобия в приложении к тектоническому эксперименту. Основная из них — разработка методики применения скользящей последовательности системы критериев подобия, характеризующей различные стадии процесса, из-за длительности которого в динамике его развития меняются определяющие параметры и абсолютные значения отдельных из них. Перед физиками и инженерами, разработавшими основы теории подобия и размерностей, такая проблема никогда не стояла. Длительность тектонических процессов, сопровождающаяся изменением режимов температур и давления и, следовательно, реологии вещества, ставит на повестку дня перед теорией подобия дополнительные вопросы. Намечаются пути к их решению [2,3].

Другую важную проблему предстоит решить в области расширения видов модельных материалов. При физическом моделировании мы используем сейчас в основном непрозрачные среды. Они не позволяют непосредственно наблюдать развитие структур на разных уровнях в глубине (внутри) модели. Значение же подобных сведений, особенно для моделирования структур рудных полей и месторождений, трудно переоценить. Поэтому задачей является расширение ассортимента модельных материалов с разными упругими и реологическими свойствами и введение в их число прозрачных сред.

Развитие экспериментальных работ в тектонофизике и их практическая значимость во многом определяется сегодня объемом и корректностью применения теории подобия и размерностей - теоретической основы экспериментальных работ.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Александрова А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973. 576 с.

2. Бабичев А.А. Критерии подобия при моделировании различных стадий разломообразования в земной коре // Экспериментальная тектоника в решении задач теоретической и практической геологии. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1982. 184 с.

3. Бабичев А.А. О некоторых принципиальных вопросах использования критериев подобия при моделировании трещин н разрывов // Геология и геофизика. 1987. № 4. С. 36-42.

4. Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Л.: Гидрометеоиздат 1978. 207 с.

5. Баренблатт Г.И., Ботвина Л.P. Методы подобия в механике и физике разрушения // Физ.-хим. механика материалов. 1986. № 1. С. 57-62,

6. Биркгоф Г. Гидродинамика. Методы. Факты. Подобие. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 244 с.

7. Гавич И.К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. М.: Недра, 1980.

8. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.

9. Гончаров М.А. Инверсия плотности в земной коре и складкообразование. М.: Недра, 1979. 246 с.

10. Гутерман В.Г. Эволюция многофазнослоистой тектоносферы. Киев: Наук. думка. 1977. 156 с.

11. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высш. шк., 1973. 295 с.

12. Кутателадзе С.С. Анализ подобия в теплофизике. Новосибирск: Наука, 1982. 280 с.

13. Люстих Е.Н. Условия подобия при моделировании тектонических процессов // Докл АН СССР 1949. Т. 64, № 5. С. 661-664.

14. Михайлов Н.В., Ребиндер П.А. О структурно-механических свойствах дисперсных и высокомолекулярных систем // Коллоид. журн. 1955. Т. 17. С. 107-119.

15. Назаров А.Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1965» 87 с.

16. Насонов И.Д. Моделирование горных процессов. М.: Недра, 1969. 206 с.

17. Осокина Д.Н. Пластические и упругие низкомодульные оптически активные материалы для исследования напряжений в земной коре методом моделирования. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 196 с.

18. Осокина Д.Н., Гзовский М.В. Корреляционная зависимость между затуханием упругих волн и сдвиговой вязкостью у реальных сред // Вопросы теоретической и экспериментальной реологии горных пород. Киев: Наук. думка, 1974. Вып. 3. С. 48-67.

19. Покровский Г.И., Федоров И.С. Центробежное моделирование для решения инженерных задач. М.: Госстройиздат, 1953. 118 с.

20. Рамберг X. Моделирование деформаций земной коры с применением центрифуги. М.: Мир, 1970.

21. Розовский Л.Б. Введение в теорию геологического подобия и моделирования. М.: Недра, 1969. 127 с.

22. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1983. 430 с,

23. Семинский К.Ж, Структурно-механические свойства глинистых паст как модельного материала в тектонических экспериментах. Иркутск, 1986. 130 с. Деп. в ВИНИТИ. 13.08.86, № 5762-В86.

24. Филиппов Л.П. Подобие свойств веществ. М.: Изд-во МГУ, 1978, 255 с.

25. Шеменда А.И. Условия и методика физического моделирования процесса поддвига литосферных плит // Проблемы теоретической геодинамики и тектоники литосферных плит. М.: ИО АН СССР, 1981. С. 118-135.

26. Шеменда А.И. Критерии подобия при механическом моделировании тектонических процессов // Геология и геофизика. 1983. № 10. С. 10—19.

27. Шерман С.И. Физический эксперимент в тектонике и теория подобия // Там же. 1984, № 3. С. 8-18.

28. Шерман С.И. Эксперимент в геотектонике и теория подобия // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. М.: Наука, 1985. С. 25-37.

29. Шнеерсон Б.Л. О применении теории подобия при тектоническом моделировании. Тр. Ин-та теорет. геофизики АН СССР. 1947. Т. 3. С. 94-106.

30. Buckingham Е. On physically similar systems: illustrations of the use of dimensional equations // Phys. Rev. 1914. Vol. 4. P. 345-376.

31. Bucky P.B. The use of models for the study of mining problems // Tech. Publ. Amer. Inst. Miner. Ehgrs. 1931. №425. P. 1113-1119.

32. Durelli G.J., Phillips E.A., Tsao C.H. Introduction to the theoretical and experimental analysis of stress and strain. N.Y.; McGraw-Hill, 1958. 251 p.

33. Gröber H. Grundgesetzeder Wärmeleitung und des Wärmeüberdanges. B.: Springer, 1921. 436 S.

34. Hubbert M.K. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures // Bull. Geol Soc. Amer. 1937. Vol. 48. P. 1459-1519.

35. Ramberg H. Experimental study of gravity tectonics by means of centrifuged models// Bull. Geol. Inst. Univ. Upsala. 1963. Vol. 42, №1. P. 35-51.

1. \* Соавтор А.А. Бабичев. Экспериментальная тектоника. Методы, результаты, перспектива. – М.: ИФЗ, МГУ, 1989. – С. 57–77. [↑](#footnote-ref-1)
2. 1 Критика рекомендаций Х. Рамберга представляет здесь необоснованной, так как инерционные силы в медленных тектонических процессах действительно являются пренебрежительно малыми, поэтому для большинства моделей упрощение Х. Рамберга [20] приемлимо [26]. – (Прим. ред.) [↑](#footnote-ref-2)
3. 1 Указанные ограничения действительны для моделирования на упругих материалах (фотоупругость), но не для оптического метода в целом, включающего моделирование на вязких и пластичеых материалах (фотовязкость и фотопластичность). – (Примеч. ред.) [↑](#footnote-ref-3)
4. 2 Утверждение не строго, поскольку величина одного из главных напряжений (при нулевом значении второго) прямо определяется на свободном контуре модели. Так же прямо фиксируются относительная и абсолютная величина разности главных напряжений и их направления соответственно изохромами (порядок полос и разность хода) и изоклинами (угловые параметры). – (Примеч. ред.) [↑](#footnote-ref-4)
5. 3 Наиболее важное свойство водных паст глины – наличие у них резко выраженного условного предела текучести, проявляющегося в чрезвычайно сильной (на много порядков) перепаде эффективной вязкости в узком интервале напряжений сдвига. Реологические свойства влажной глины исследовались в работах П.А. Ребиндера с сотрудниками, А.М. Горьковой, М.В. Гзовского, Д.Н. Осокиной, А.Н. Бокуна, С.А. Борнякова, К.Ж. Семинского и др. – (Примеч. Ред.) [↑](#footnote-ref-5)