**С.И. Шерман**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ТЕКТОНИКЕ И ТЕОРИЯ**

**ПОДОБИЯ[[1]](#footnote-1)\***

Рассматриваются методы физического моделирования в тектонике: динамическо­го нагружения, центрифугирования, фотоупругости и статического нагружения. При­ведены основные физические уравнения подобия и критерии-комплексы. Прилагает­ся таблица, охватывающая основные уравнения коэффициентов подобия, которые ре­комендуется использовать при физическом моделировании в геотектонике.

Эксперимент как метод исследования давно используется в науках о Земле, в частности в геотектонике, и роль его и в целом моделирования возрастает. В дополнение к объяснению механизма формирования текто­нических структур эксперимент теперь призван способствовать получению численных характеристик моделируемых форм, количественному описа­нию процессов и действующих сил, а также помогать прогнозировать те­чение процесса и развитие структур.

Для решения прогнозных задач в геотектонике, количественной оцен­ки реальных структур и тенденции их развития в геологических масшта­бах времени большое значение имеет и правильная интерпретация данных эксперимента. Прогноз по эксперименту немыслим без строгого применения теории подобия и размерностей. Внешнее подобие сходства геологических природных объектов и структурных форм модели необходимое, но недоста­точное условие тождественности природных и воспроизводимых на моде­ли процессов.

Для снятия с модели количественных характеристик структур, ана­лиза процессов и использования модели для прогнозных заключений не­обходимы доказательства геометрического и физического подобия модели­руемых и природных процессов. Способствовать этому может теория по­добия и размерностей.

Теория подобия и размерностей неплохо разработана для различных наук, в которых используется эксперимент. При моделировании геологи­ческих процессов первые попытки использовать теорию подобия принад­лежат Ж. Конигбергу и О. Морату, работу которых цитирует М. Хаберт [17]. Условия подобия при экспериментах в тектонике рассмотрены в [2, 7—10, 12—16 и др.]. Среди тектонистов наибольшую известность в этом вопросе имеют работы М.В. Гзовского [3, 4].

При выборе критериев подобия М.В. Гзовский исходил прежде всего из анализа дифференциальных или интегральных уравнений, опи­сывающих изучаемый процесс, т. е. характеризующих общие свойства тектонических явлений. Такие основные уравнения — уравнения теории упругости, пластичности, движения вязкой жидкости. На базе их полу­чен ряд множителей подобия, которые, в конце концов, свертываются до трех основных условий критериев подобия: для моделирования кинети­ческой энергии процессов:

, (1)

для моделирования в упругих средах:

, (2)

для моделирования на пластичных средах:

, (3)

где *С* — коэффициенты подобия: *Е* — упругих свойств материалов, ρ — плотностей, *L* — размеров, *g* — ускорений силы тяжести, η — вязкостей, τ — касательных напряжений, *t* — времени, *U* — энергии процессов.

М. В. Гзовский [4] разработал п более тонкие детали обсуждаемого вопроса. Тем не менее сегодня многие эксперименты в тектонике прово­дятся без анализа критериев подобия, что сильно обедняет содержание экспериментов.

Возможно, что отсутствие обоснования подобия моделируемых про­цессов в некоторых экспериментах связано с тем, что в свое время не было уделено должного внимания конкретным разработкам применения тех или иных критериев для определенного вида (способа) моделирования.

В современных научных исследованиях применяются три вида мо­делирования: физическое, математическое и функциональное. Наиболее широкое применение в геотектонике получило физическое моделирование. По сравнению с другими видами оно обладает рядом преимуществ: на­глядностью, необязательностью точного знания всех параметров и урав­нений, описывающих процесс, возможностью исследования краевых эффек­тов и активного учета параметра времени и др.

Собственно физическое моделирование в геотектонике состоит из не­скольких методов, среди них наиболее распространены методы динамиче­ского нагружения, центробежного моделирования, или центрифугирования, фотоупругости, статического нагружения, а также различные вспомога­тельные методы.

*Метод динамического нагружения* применяется при изучении меха­низма образования структур, оперяющих трещин, трубок взрыва, эффектов и явлений, сопровождающих формирование структур (акустического, магнитного), полей напряжений и при моделировании более сложных гео­динамических процессов (например, поддвиг литосферных плит).

Моделируемые процессы сложны по своей физической природе. В ос­нове их может лежать упругая или пластическая деформации 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 часто непреодолимые труд­ности в решении уравнений деформируемой массы, 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 иногда затруднено.

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

, (4)

, (5)

, (6)

, (7)

где *L* – линейные размеры сходных величин модели и объектов; *V* – скорости движения и *F* и *P* – сила и вес (давление) в сходственных точках в модели и объекте; *С* – множители подобия; *СL*; *CF*; *CV*; *CP* – главные критерии-симплексы, определяющие подобие при динамическом нагружении.

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

. (8)

Уравнения (4)-(8) 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 описываться основными уравнениями механики, или вторым законом Ньютона:

, (9)

, (10)

, (11)

где *F* – сила; *P* – вес; *a* – ускорение; *g* – ускорение силы тяжести; *U* – кинетическая энергия; *m* – масса; *V* – скорость.

Поскольку силы и энергия часто не учитываются в экспериментах, 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:

, (12)

или уравнением Коши, выражающими зависимость между деформациями и малыми перемещениями:

, (13)

где *ε* — деформация;σ— напряжение; *Е* — модуль Юнга,— перемеще­ния; *L* — длина.

Уравнения (9)—(11) характеризуют физический процесс в наиболее общем виде и не учитывают свойств материалов, линейные размеры мо­делируемого объекта и время деформирования или действия силы. Уравне­ние (12) учитывает упругие свойства среды, но не учитывает линейные раз­меры объекта и длительность процесса, а уравнение (13) используется толь­ко при очень малых деформациях, т.е. практически при упругом деформировании.

Физический процесс при пластической деформации описывается ра­венством

 (14)

связывающим касательные напряжения τ со скоростью относительной де­формациии вязкостью материала η.

Уравнения (9)—(14) практически охватывают все случаи моделирова­ния методом динамического нагружения в геотектонике. 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 длительности эксперимента, что особенно важно при практическом использовании ре­зультатов моделирования и экстраполяции 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 (*E*), плотность (ρ), линейный размер тела или расстояние (*L*), ускорение силы тяжести(*g*), сила(*F*), время (*t*), скорость (*V*). Названные параметры будем считать главными п полагать наличие между ними функциональной связи. Базой для динамически подобных состояний станут уравнения:

, (12) , (15)

, (16) , (17)

, (18) , (19)

Уравнения (18) и (19) — соответственно критерии Струхаля и Фруда, хорошо известные 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 (см. таблицу), рекомендуемых для использо­вания при моделировании методом динамического нагружения.

Таблица

Основные уравнения и критерии подобия при физическом моделировании в геотектонике

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Методы | Основные свойства эк-вивалентных материалов | Определяю-щие парамет-ры | Основные физические уравнения и критерии-комплексы | Критерии-комплексы по анализу размерностей | Коэффициенты подобия |
| Динамическое нагружение | Хрупкие и упругие | *E*, σ, ρ, *F*, *L*, *g*, *t*, *V* | ,,,, | ,,,(критерий Струхаля), (критерий Фруда) | ,,,,,,,, |
| Пластичные | η, *t*, *L*, ρ, , *g*, τ, *V* |  | ,,,(число Рейнольдса) | ,,,,, |
| Центрифугирование | Хрупкие и упругие |  | , |  | ,,, |
| Пластичные | η, *t*, *L*, ρ, *g*, *а*, *V* |  | (критерий Струхаля), (критерий Фруда),,,(число Рейнольдса) | ,,,,, |
| Фотоупругость | Оптические изотропные упругие | σ, *E*, *F*, *L* | , | ,, | ,,, |
| Статистическое нагружение | Упругие и пластичные | *Px*, ρ, *g*, *L*, *t*, σпр, η | , | ,,, | ,,,,,, |

Примечание. *L* – линейные размеры, – перемещения, *t* – время, *m* – масса, *F* – сила, *P* – вес, *Px* – давление, *S* – площадь, *U* – кинетическая энергия, *E* – модуль Юнга, σ – нормальные и τ – касательные напряжения, σпр – предел прочности, η – вязкость, ρ – плотность, γ – удельный вес, *V* – скорость, *V*об – объем, *а* – ускорение, *g* – ускорение силы тяжести, *W* – частота, ε – относительная деформация, – скорость деформации.

Наибольший практический интерес представляет критерий-комплекс , 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*):

. (20)

Л.Б. Розовский [14] рекомендует использовать этот критерий (или критерий гомохронности) для моделирования подобия времени протекания геологических движений. Последнее справедливо, если геологические процессы связаны с вращательными или колебательными движениями. Более удобно применять число Фруда(19)[[2]](#footnote-2)1, которое после преобразо­ваний можно записать

 (21)

и преобразовать в уравнение коэффициентов подобия

, (22)

приведенное в таблице.

Для моделей в гравитационном поле Земли. По этому кри­терию можно моделировать развитие структур во времени, или оценивать, наоборот, 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 пластичных материалах. Физический про­цесс описывается уравнением (14), из которого после преобразований можно получить группу уравнений коэффициентов подобия (см. таблицу). Одно из них соответствует уравнению (3), по М.В. Гзовскому [4].

В основное уравнение (14) 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 относятся: вязкость (η), время(*t*), размеры объекта (*L*), ускорение (*g*), плотность (ρ), скорость деформации (), напря­жения (σ), скорость потока (*V*).

Базой для динамически подобных состояний будут уравнения:

, (23)

, (24)

, (25)

. (26)

Наиболее емким является уравнение (24), которое охватывает глав­ные определяющие параметры, характеризующие моделируемый процесс. Преобразования (24) приводят к следующему соотношению коэффициентов подобия:

. (27)

Уравнение (27) является основным критерием-комплексом подобия при моделировании тектонических процессов [4, 8]. При моделировании без применения ускоряющих устройств, когда *Cg* = 1, уравнение (27) упро­щается:



Если учесть, что при моделировании геотектонических процессов и структур *С*η и *Сt* оцениваются числами 6—12 порядков, можно прене­бречь*C*ρ, поскольку плотность эквивалентных материалов измеряется в тех же порядках, что и горные породы, или, в крайнем случае, на один порядок ниже. Тогда

.

Последний критерий-комплекс необходимо соблюдать обязательно. Попутно заметим, что М.А. Гончаров [5] успешно использовал его при мо­делировании и оценке параметров адвекции. При моделировании на плас­тичных материалах произвольно выбирать масштабы модели и время дли­тельности эксперимента нельзя.

Уравнение (24) является одной из форм представления числа Рейнольда (26). При моделировании движения тела в несжимаемой вязкой жидкости число Re отражает ламинарный или турбулентный характер пото­ка. Высокое значение Re свидетельствует о турбулентности потока. В экспериментах на вязких материалах число Re получается очень низким (порядка 10-9÷-12), что свидетельствует об исключительно ламинарном 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.

*Метод центрифугирования* также очень широко распространен в гео­тектонике. Он применяется для моделирования прежде всего явлений, вызываемых силой тяжести. В основе метода центрифугирования динамических моделей лежит принцип, согласно которому в моделях центробеж­ная сила играет ту же роль, что и сила тяжести в геологии. Но поскольку *а* мы можем увеличивать в несколько тысяч раз, то и модельные материалы можно использовать менее прочные и менее вязкие, выиграв время дли­тельности процесса.

Наиболее серьезным исследованиям по применению центрифуги для моделирования посвящены [11, 12 и др.]. Для целей геотектонических построений серьезные опыты с применением центрифуги ведет В.Г. Гутерман [6], методические основы применения этого метода разработал X. Рамберг [12], предложивший коэффициенты подобия для центрифуги­руемых моделей. В основном это критерии-симплексы. В экспериментах исследователи добивались подобия линейных и прочностных характе­ристик, связанных чаще всего уравнением

. (28)

Экспериментатор должен соблюдать главное [12] условие: экспери­мент не должен длиться больше нескольких часов и деформация не долж­на происходить слишком быстро, чтобы число Рейнольдса не превысило критического значения и не началась турбулентность. Последнее, как уже отмечалось, легко преодолимо. Эффект Кориолиса, как показано в [12], ничтожен и в расчет не принимается.

X. Рамберг [12] в своих опытах отказывался от условия, описывающего зависимость между размерами моделируемых объектов и временем деформирования при *Сg* = 1, и считал, что поскольку ускоре­ние в тектонических процессах пренебрежимо мало (кроме землетрясений), то 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, из экспери­мента можно извлечь лишь качественную картину, что не соответствует требованиям сегодняшнего дня.

Метод центробежного моделирования основывается на динамическом подобии Ньютона и, по существу, является разновидностью метода ди­намического нагружения.

В основе физических процессов лежит уравнение (9), причем в усло­виях земных недр сила равна весу толщи горных пород. Сила тяжести играет роль деформирующей силы. Отсюда,

. (29)

В центрифуге сила давления *F* определяется из развиваемого ускорения *a* и равна центробежной силе

. (30)

Подобие процессов будет соблюдено, если



Кроме того, могут быть использованы общие критерии-комплексы метода динамического нагружения (см. таблицу).

Если при моделировании применяются хрупкие материалы, деформа­ция которых подчиняется закону Гука, то основным уравнением подобия явится отношение (15), из преобразований которого следует основное соот­ношение коэффициентов подобия:

. (32)

Из (32) видно, что можно оценивать размеры структур, получаемые при моделировании, и прогнозировать их на природные процессы.

Однако хрупкие материалы редко применяются при моделировании, а при методе центрифугирования вообще практически не применяются. Поскольку динамический процесс при центрифугировании тот же, что и при динамическом нагружении, используем соотношение критериев из уравнения (27). Оно по практически максимальному числу параметров характеризует физический процесс при центрифугировании. Из критери­ев-комплексов следует группа основных уравнений коэффициентов подобия, рекомендуемых для моделирования на центрифуге (см. таблицу).

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 вопрос.

Без учета параметра времени для оценки соотношений размеров мо­дели и натуры можно использовать критерий, приводимый И.Д. Насо­новым [10]:

, (33)

где *а* — полное ускорение какой-либо точки модели на центрифуге.

Из (33) следует, что на модель должны действовать центробежные силы, превосходящие силу тяжести во столько раз, во сколько раз модель меньше исследуемой области в натуре.

Уравнение (22), если его удастся выполнить при моделировании на центрифуге, позволяет оценивать одновременное соотношение масштабов моделируемого объекта и времени моделирования. Но оно не учитывает свойств материала и применяется в тех случаях, когда физико-механические свойства модельного материала и натурного объекта близки.

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

*Метод фотоупругости* в тектонических экспериментах имеет узко­целевую задачу по изучению напряжений в складчатых и разрывных структурах и в окружающих их зонах.

Физическая основа метода — эффект появления оптической анизо­тропии в изотропных телах, пропорциональной внутренним напряже­ниям, возникающим под действием внешних сил. Такая пропорция 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 [1]. Уже этим фактом накладываются определенные ограничения на возможность распространения результатов моделирования на геологические процессы и медленные тек­тонические деформации, отвечающие пластическому или квазипластическому течению.

Оптический метод не фиксирует прямо главные нормальные напряже­ния: в оптическом эффекте проявляется разность между ними, т.е. мак­симальные касательные напряжения:

. (34)

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  (35)

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 τmax. Приняв во внимание физическую природу метода фотоупругости, оценим самые 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.

Моделирование динамических процессов на оптически активных мо­делях связано с большими трудностями, а если деформация носит упругопластический или пластический характер — практически невозможно. Вероятно, поэтому большинство экспериментов в геотектонике с исполь­зованием этого метода носит качественный характер.

Для оптического метода должно быть соблюдено геометрическое и ме­ханическое подобие.

Условия инвариантности физических процессов в модели и объекте вытекают либо из закона Гука (12) о пропорциональности деформаций приложенным напряжениям, либо из уравнений Коши (13), описывающих пропорциональность деформаций малым перемещениям. Во всех случаях должна соблюдаться пропорциональность сил (6). Коэффициенты Пуассо­на в натуре и эквивалентном материале должны быть одинаковы.

Связь деформируемых 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 основных уравнения коэффициентов подобия (см. таблицу).

Ни закон Гука, ни уравнения Коши не дают возможности ввести в ос­новные уравнения коэффициентов подобия параметр времени. Исполь­зовать же другой закон нельзя, так как исчезнет физический смысл, лежащий в основе метода фотоупругости. Важный для геологии параметр времени этот метод не учитывает.

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 структур.

*Метод статического нагружения* редко применяется в геотекто­нике. Скорее всего это связано с тем, что до настоящего времени серьезно не ставились задачи выяснения соответствия между давлением, вязкостью, напряжением и линейными размерами структур. В таблице приведены физические уравнения, критерий-комплексы и основные соотношения ко­эффициентов подобия, рекомендуемые при моделировании методом статического нагружения.

Таблица охватывает все основные уравнения коэффициентов подобия, которые могут использоваться при физическом моделировании в геотек­тонике. Естественно, что условия опыта должны удовлетворять какому-то одному соотношению. Но даже и это требование не всегда удовлетворяется. В настоящее время проводятся сотни различных экспериментов, на базе которых в геотектонике делается такое же число или больше выводов. Выводы в ряде случаев справедливы, нередко же они некорректны. По­следнее особенно часто бывает тогда, когда экспериментатор добился в опы­те геометрического подобия структур, но синхронно не сопоставил другие необходимые коэффициенты подобия, в частности, соотношение рангов (линейных размеров). Бывает, что моделируются структуры одних раз­меров, а выводы делаются для структур совершенно других масштабов и геологической значимости. То же относится и к процессам. Бывает и наоборот: экспериментатор от модели берет меньше информации, чем она дает. Так, при некоторых опытах можно оценивать порядок тектониче­ских сил, длительность процессов и т. п. Это опускается.

Наконец, не надо забывать, что эксперимент, как один из методов на­учных исследований, призван не только объяснить явление. Моделиро­вание в геотектонике при более строгом применении теории подобия и раз­мерностей дает возможность количественно оценивать моделируемые про­цессы и структуры и предсказывать их в натуре. Такова задача модели­рования в геотектонике сегодня. Необходимо корректно придерживаться существующих общих правил физического моделирования и соблюдать подобие по основным параметрам натурных и лабораторных процессов. Более строгими станут эксперименты, увеличится их теоретическая и прак­тическая ценность, исчезнут опирающиеся на некорректные эксперименты геотектонические построения и гипотезы.

Автор благодарит А.А. Бабичева, В.И. Громина и В.К. Кучая за обсуждение и советы, высказанные при чтении рукописи статьи.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Александров А. Я., Ахметзянов М. X. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М: Наука, 1973.

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

3. Гзовскин М. В. Метод моделирования в тектонофизике — Сов. геол., 1958, № 4.

4. Гзовскин М. В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975.

5. Гончаров М. А. Инверсия плотности в земной коре и складкообразование. М.: Недра, 1979.

6. Гутерман В. Г. Эволюция многофазнослоистой тектоносферы. Киев: Наукова думка, 1977.

7. Кацауров И. Н. Механика горных пород. М.: Недра, 1981.

8. Люстих Е. Н. Условия подобия при моделировании тектонических процессов — ДАН СССР, 1949, т. 64, № 5.

9. Назаров А. Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1965.

10. Насонов И. Д. Моделирование горных процессов. М.: Недра, 1969.

11. Покровский Г. И., Федоров И. С. Центробежное моделирование для решения инже­нерных задач. М. Госстройиздат, 1953.

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

13. Резняков А. Б. Метод подобия. Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1959.

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

15. Шеменда А. И. Условия и методика физического моделирования процесса подвига литосферных плит. – В кн.: Проблемы теоретической геодинамики и тектоника литосферных плит. М.: ИОАН, 1981.

16. Шнеерсон Б. Л. О применении теории подобия при тектоническом моделировании. — Тр. Института теоретич. геофиз. АН СССР. 1947, т. 3.

 17. Hubbert М. К. Theory of scale models as applied to the study of geological structures. — Bull. Geol. Soc. Amer., 1937, v. 48, N 1459.

1. \* Геология и геофизика. – 1984. – № 3. – С. 8–18. [↑](#footnote-ref-1)
2. 1 В гидродинамике используют число Фруда в виде . [↑](#footnote-ref-2)