**ЭКСПЕРИМЕНТ В ГЕОТЕКТОНИКЕ И ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ[[1]](#footnote-1)\***

Эксперимент как метод исследования давно используется в науках о Земле, в частности в геотектонике. Развитие геотектоники ставит перед экспериментом новые и все более сложные задачи. Роль эксперимента и в целом моделирования возрастает, и как способ познания моделирование превращается в один из основных методов современного анализа в геотектонике. В дополнение к объяснению механизма формирования текто­нических структур эксперимент призван способствовать получению численных ха­рактеристик моделируемых форм и количественному описанию процессов и действующих сил; он может помочь исследователю прогнозировать течение процесса и развитие структур, что повышает его практическое и теоретическое значение. Для решения прогнозных задач в геотектонике, количественной оценки морфологии структур и тенденций их развития в геологических масштабах времени большое значение имеет правильная интерпретация данных эксперимента.

Сегодня большая часть эксперимента ставится для объяснения механизма образования структур. Но этого недостаточно. Необходимо шире использовать моделирова­ние для целей прогнозов в широком понимании этого слова. Прогноз по эксперименту немыслим без строгого применения теории подобия и размерностей. Внешнее подобие, сходство геологических природных объектов и структурных форм модели — необходи­мое, но недостаточное условие тождественности природных и воспроизводимых в эксперименте процессов.

Для получения количественных характеристик структур, анализа протекающих процессов и использования модели для прогнозных заключений необходимы доказательства геометрического и физического подобия моделируемых и природных объектов и явлений. Способствовать этому может применение теории подобия и размерностей.

Теория подобия неплохо разработана для различных наук, в которых используется эксперимент [Резняков, 1959; Гавич, 1980]. При моделировании геологических процессов первые попытки использовать теорию подобия и размерностей принадлежат Г. Кёнигсбергеру и О. Морату, работу которых 1913 г. цитирует М. Хабберт [Hubbert, 1937]. Условия подобия при экспериментах в тектонике рассмотрены Б.Л. Шнеерсоном [1947], Е.Н. Люстихом [1949], А.Г. Назаровым [1965], И.Д. Насоновым [1969], Л.Б. Розовским [1969] и др. Среди тектонистов наибольшую известность по этому вопросу имеют работы М.В. Гзовского [1958, 1975].

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. Основными такими уравнениями явились уравнения теории упругости, пластичности и движения вязкой жидкости. На базе этих уравнений М.В. Гзовским получен ряд множителей подобия, соотношения между которыми, в конце концов, сводятся к трем основным условиям (критериям) подобия:

для моделирования кинетической энергии процессов:

, (1)

для моделирования на упругих средах:

, (2)

для моделирования на пластичных материалах:

, (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. Гзовским [1975] разработаны и более тонкие детали обсуждаемого вопроса. И тем не менее сегодня многие эксперименты в тектонике проводятся без анализа критериев подобия. Это сильно обедняет их содержание.

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.

По целям и задачам, наиболее часто решаемым в геотектонике, моделирование может быть классифицировано на четыре основные группы.

1. Моделирование простых структур с целью выяснения связи между способом деформирования (приложения нагрузки) и образующимися тектоническими форма­ми, их геометрическими размерами, и другими параметрами.

2. Моделирование сложных структур с целью выяснения связи механизма их образования и динамики развития с возможным прогнозом эволюции тектонических структур.

3. Моделирование простых тектонических явлений и структур с целью установления связи между их развитием и генетически связанными с ними процессами.

4. Моделирование сложных структур с целью изучения связей между развитием комплекса тектонических структур и генетически связанными с ними процессами (моделирование тектонического режима).

В настоящее время экспериментальная тектоника решает в основном первые две группы задач. Редкие эксперименты стремятся к комплексному моделированию формирования структур и сопровождающих их процессов. Да и в них чаще всего наблюде­ния ведутся за какой-то одной стороной явления, и комплексный характер экспери­мента все равно исчезает. При постановке экспериментов третьей и четвертой групп возникают теоретические (выбор критериев подобия) и технические (эксперименталь­ная база) трудности.

В современных научных исследованиях применяют три вида моделирования: физи­ческое, математическое и функциональное.

Наиболее широкое применение в геотектонике получило физическое моделирование. По сравнению с другими видами оно обладает рядом преимуществ, основными из которых являются наглядность, отсутствие необходимости точного знания всех параметров и уравнений, описывающих процесс, возможность исследования краевых эффектов и учет фактора времени. Физическое моделирование в геотектонике состоит из нескольких методов. Среди них наиболее распространены метод динамического нагружения, метод центробежного моделирования (или центрифугирования), метод фотоупругости, а также различные вспомогательные методы: статистического нагружения (метод эквивалентных материалов), методы теплопередачи и теплообмена, гидродинамические и др. Примеры использования основных методов физического моделирования были широко представлены на симпозиуме 1982 г.

Рассмотрим физическое подобие процессов и критерии подобия для основных методов физического моделирования в геотектонике.

**Метод динамического нагружения** применяется при изучении механизма образова­ния тектонических структур, оперяющих трещин, трубок взрыва, эффектов и явле­ний, сопровождающих формирование структур полей напряжений (акустического, магнитного), а также при моделировании более сложных геодинамических процес­сов (например, поддвига литосферных плит [Шеменда, 1981] и т.п.). В основе мо­делируемых процессов может лежать упругая или пластическая деформация горных пород [Кацауров, 1981], а чаще всего более сложная во времени, математическое описание которой трудно (или даже практически невозможно) сделать одним или несколькими уравнениями из-за неопределенности некоторых параметров этой де­формации. Помимо этого, часто возникают непреодолимые трудности в решении урав­нений деформируемой массы, так как приходится интегрировать системы нелинейных уравнений второго порядка в частных производных при соответствующих начальных и граничных условиях. Так что с математической стороны проблема очень сложна и ее точное решение не всегда удается получить. Поэтому установление подобия физи­ческих процессов в натуре и эксперименте иногда затруднено. Необходимо использо­вать анализ систем параметров, определяющих класс явлений (составление таблиц определяющих параметров), и анализ размерностей.

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

, (4)

где, , ‒ сходственные размеры модели; , , — сходственные размеры объекта.

Симплекс 4 требует, чтобы в сходственных точках пространства в сходственные моменты времени соблюдались пропорции и других величин, связанных с кинемати­кой движения тела, т.е.

, (5)

, (6)

, (7)

гдеυ *-* скорость движения в сходственных точках в модели и объекте; *F, Р —* сила и вес (давление) в сходственных точках в модели и объекте; *С* - коэффициенты по­добия; *СL*; *Сυ*; *СF*; *СP —* главные критерии-симплексы, определяющие подобие при динамическом нагружении.

Критерии-симплексы можно оценить только после анализа моделируемого физического процесса.

Поскольку в кинематике рассматриваются процессы движения, то необходим учет и единицы времени *t*, которая в сходственных точках также должна быть пропорцио­нальна:

. (8)

В наиболее общем виде моделируемый физический процесс при динамическом нагружении будет описываться основными соотношениями механики, или вторым законом Ньютона:

 (9)

или

 (10)

и

, (11)

где *F* *‒* сила; *Р ‒* вес; *а* *‒* ускорение; *g ‒* ускорение силы тяжести; *U ‒* кинетическая энергия; *m* *‒* масса; υ *‒* скорость.

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

, (12)

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

, (13)

где ε *‒* относительная деформация; σ *‒* напряжение; *E* —модуль Юнга; *l* — перемеще­ние; *L —* длина.

Уравнения (9) *‒* (11) характеризуют физический процесс в наиболее общем виде и не учитывают свойств материала, линейные размеры объекта и время деформиро­вания или действия силы. Уравнение Гука (12) учитывает упругие свойства среды, но не учитывает линейных размеров объекта и длительности процесса, а уравнение Коши (13) используется только при очень малых деформациях, т.е. практически при упругом деформировании (таблица).

Физический процесс при пластической деформации описывает равенство

, (14)

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

Пластические деформации описываются также законами, регулирующими движе­ние вязкой несжимаемой жидкости: уравнением сплошности и уравнением движения. Последние уравнения в меньшей степени характеризуют динамическое нагружение, и из-за громоздкости нет необходимости их приводить.

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*, υ | ,,,, | ,,,(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*, υ |  | (критерий Струхаля), (критерий Фруда),,,(число Рейнольдса) | ,,,,, |
| Фотоупругость | Оптические изотропные упругие | σ, *E*, *F*, *L* | , | ,, | ,,, |
| Статистическое нагружение | Упругие и пластичные | *P\**, ρ, *g*, *L*, *t*, σпр, η | , | ,,, | ,,,,,, |

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

Уравнения (9) *‒* (14) практически охватывают все случаи моделирования методом динамического нагружения в геотектонике. Но на их базе нельзя вывести основные критерии подобия, так как ни в одно из этих уравнений 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: напряжения σ, модуль Юнга *Е,* плотность ρ, линейный размер тела или расстояние *L,* ускорение силы тяжести *g,* сила *F,* время *t,* скоростьυ*.* Названные параметры будем считать главными и будем полагать наличие между ними функциональной связи. Базой для динамически подобных состояний будут уравне­ния (12),

, (15)

. (16)

Тогда

, (17)

, (18)

, (19)

. (20)

Уравнения (19) и (20) - 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 позволяют получить следующую группу уравнений коэффициентов подобия:

, (21)

, (22)

, (22а)

, (23)

, (24)

, (25)

. (26)

Использование критериев подобия (21) ‒ (26) позволяют моделировать и количественно оценивать не только структуры, но и процесс. Наибольший практический интерес представляет последний коэффициент подобия, критерий-комплекс (26), связывающий линейные размеры со скоростью и временем течения процесса (деформированием и т.п.). Это преобразование критерия Струхаля, который чаще использу­ется для связи частоты *w*, линейной скорости υ и пути *L*:

. (27)

Л.Б. Розовский [1969] рекомендует использовать критерий Струхаля (или критерий гомохронности) для моделирования подобия времени протекания геологических движений. Последнее справедливо, если геологические процессы связаны с враща­тельными или колебательными движениями. Более удобно использовать число Фруда (20)[[2]](#footnote-2)1, которое после преобразований может быть записано как

 (28)

и использовано в уравнении коэффициентов подобия (26).

Для моделей в гравитационном поле Земли

. (29)

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 невелика по сравнению с силой тяжести. Это очень важно, так как в модели силы инерции должны быть чрезвычайно малы.

Большая степень подобия достигается при моделировании на пластичных материалах. Физический процесс описывается уравнением (14), из которого после преобразова­ний можно получить следующую группу уравнений коэффициентов подобия:

, (30)

; (31)

уравнение (31) соответствует критерию подобия (3), предложенному М.В. Гзовским. В основное уравнение (14) не входят характерные размеры моделируемых объектов. По теории подобия и размерностей определим систему главных параметров, к кото­рым прежде всего будут относится: вязкость материала η, время *t*, размеры объекта *L*, ускорение силы тяжести *g*, плотность ρ, скорость деформации , напряжения σ, ско­рость потока υ.

Базой для динамически подобных состояний будут уравнения

, (32)

, (33)

, (34)

. (35)

Наиболее емким является уравнение (33), которое охватывает главные определяю­щие параметры, характеризующие моделируемый процесс. Преобразование уравне­ния (33) приводит к следующему соотношению коэффициентов подобия:

. (36)

Уравнение (36) является основным критерием-комплексом подобия при моделиро­вании тектонических процессов. На нем акцентировали внимание Е.Н. Люстих [1949] и М.В. Гзовский [1975]. При моделировании без применения ускоряющих устройств, когда *g* = 1, уравнение (35) упрощается:

. (37)

Если учесть, что при моделировании тектонических процессов и структур *С*η и *Сt*, оцени­ваются числами 6‒12 порядка, то можно пренебречь величиной *С*ρ, поскольку плотность эквивалентных материалов изменяется в тех же пределах, что и плотность горных пород, или в крайнем случае на один порядок ниже. Тогда

. (38)

Критерий-комплекс (38) необходимо соблюдать обязательно. Из него следует, что при моделировании на пластичных материалах произвольно выбирать масштабы модели и время длительности эксперимента нельзя. Попутно заметим, что М.А. Гончаров [1979] успешно использовал его при моделировании и оценке параметров адвекции.

Уравнение (33) 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 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 и о том, что сила инерции мала по сравнению с силой вязкого трения. 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 тектонических явлений, вызывае­мых силой тяжести. В основе метода центрифугирования динамических систем лежит принцип, согласно которому центробежная сила в моделях играет ту же роль, что и сила тяжести в геологии. Но поскольку ускорение мы можем увеличивать в несколько тысяч раз, то можно использовать и более вязкие модельные материалы, выиграв время длительности процесса.

Наиболее серьезные исследования по применению центрифуги для моделирования провели Г.И. Покровский [Покровский, Федоров, 1953] и X. Рамберг [1970]. Для целей геотектонических построений серьезные опыты с применением центрифуги про­водит В.Г. Гутерман [1977] и др.

Методические основы применения метода центрифугирования для геотектонических построений разработал X. Рамберг [1970], им были предложены коэффициенты подобия для этих видов моделей (см. таблицу). В основном это критерии-сим­плексы. В экспериментах соблюдалось подобие линейных и прочностных характеристик, связанных чаще всего уравнением

. (39)

По мнению Х. Рамберга, экспериментатор должен соблюдать главное 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 показал X. Рамберг [1970, с. 55], ничтожен и в расчет не при­нимается.

В своих опытах X. Рамберг отказывался от условия (29), описывающего зависи­мость между размерами моделируемых объектов и временем деформирования при *Cg* = 1, считая, что поскольку ускорение в тектонических процессах пренебрежимо мало (кроме землетрясений), то не будет никакой ошибки, если отказаться от усло­вия (29) и считать величины *L* и *t* в экспериментах независимыми. Однако это не со­всем корректно. Время в геотектонике тесно связано с развитием геологических струк­тур и их размерами. Если пренебречь этим и следовать рекомендациям X. Рамберга, из эксперимента можно извлечь только 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 земныхнедр *F = Р*, т.е. весу толщи горных пород. Рассматривается случай, когда сила тяжести играет роль деформирующей силы. Отсюда

****. (40)

В центрифуге сила давления *Р* определяется из развиваемого ускорения *а* и равна центробежной силе

****. (40а)

Подобие процессов будет соблюдено, если

. (41)

Введя критерии-симплексы *СF*, *C*ρ, *CV*об, *CL*, *CP*, получим уравнения коэффициентов подобия

, (42)

, (43)

, (44)

, (45)

. (46)

Кроме того, могут быть использованы общие критерии-комплексы метода динами­ческого нагружения (15), (19), (20), (33), (35), а также

. (47)

Если при моделировании используются хрупкие материалы, деформация которых подчиняется закону Гука, то основным уравнением подобия явится отношение (15), из преобразований которого следует соотношение коэффициентов подобия (22). Из него видно, что можно оценивать размеры структур, получаемых при моделировании, и экстраполировать их на природные объекты.

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, можно использовать соотношение критериев подобия уравнения (36). Оно практически по максимальному числу параметров характеризует физический процесс при центрифугировании.

Заметим, что в таблице коэффициентов подобия для центрифугируемых моделей X. Рамберг для оценки *Сt*, дает соотношения, совпадающие с уравнением (36), без обоснования физической сущности процесса.

Из комплексных критериев метода динамического нагружения (15), (19), (20), (33), (35) и (47) следуют уравнения коэффициентов подобия (24), (26), а также

, (48)

, (49)

. (49a)

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

Некоторые процессы, связанные со всплыванием соляных куполов или гранитных массивов, которые часто обсуждаются в геотектонике, можно оценивать через уравнение Навье‒Стокса и моделировать на центрифуге. Здесь мы не рассматриваем этот вопрос.

Для оценки соотношений размеров модели и натуры без учета параметра времени можно использовать критерий, приводимый И.Д. Насоновым [1969]:

, (50)

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

Из уравнения (50) следует, что на модель должны действовать центробежные силы, превосходящие силы тяжести во столько раз, во сколько модель меньше области в натуре.

Уравнение (26) позволяет оценивать одновременное соотношение масштабов моде­лируемого объекта и времени моделирования. Но оно не учитывает свойств материала и может быть использовано в тех случаях, когда физико-механические свойства модель­ного материала и натурного объекта близки.

Тектонистами еще полностью не раскрыты возможности метода центрифугирования. Он может использоваться для оценки тектонических сил, времени и скорости развития отдельных тектонических структур. Представляется целесообразным комбинация ме­тода центрифугирования с динамическим нагружением для постановки экспериментов по деформациям в глубоких частях литосферы.

Метод фотоупругоста применяется в тектонических экспериментах для изучения напряжений в моделях геологических структур.

Физической основой метода является эффект появления оптической анизотропии в изотропных телах, пропорциональной внутренним напряжениям, возникающим под действием внешних сил. Деформируемые тела описываются законом Гука, а также уравнениями Коши, определяющими связь между малыми деформациями и перемещениями [Александров, Ахметзянов, 1973]. Оптический метод не фиксирует прямо глав­ные нормальные напряжения. В оптическом эффекте проявляется разность между глав­ными напряжениями, т.е. максимальные касательные напряжения:

. (51)

Распространение лучей в напряженной пластине происходит 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

 (52)

или максимальному касательному напряжению



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

Зная толщину исследуемой пластинки-среза *d,* оптическую постоянную *С* и оценив разность хода Г по различию цветовой окраски и таблице соотношений цвета и длины волн, можно найти τmax.

Исходя из физической природы метода фото упругости, оценим самые общие крите­рии подобия. Поскольку моделируются напряжения в упругом теле и поскольку они исчезают со снятием нагрузки, метод фотоупругости может быть применен в первую очередь для оценки напряжений, связанных с упругой стадией деформации. Для оптического метода должно быть соблюдено геометрическое и механическое подобие.

Условия инвариантности физических процессов в модели и объекте вытекают либо из закона Гука о пропорциональности деформаций приложенным напряжениям (12), либо из уравнения Коши (13), описывающих пропорциональность деформаций малым перемещениям.

Из уравнений (12) и (13) после преобразований следуют формулы (21) и

****. (54)

Во всех случаях должна соблюдаться пропорциональность сил (6). Коэффициенты Пуассона в натуре и эквивалентном материале должны быть одинаковы.

Для связи деформируемых сил, напряжений и линейных размеров воспользуемся теорией размерностей. Определяющими параметрами явятся величины *L*, σ, *Е*, *F*, связанные уравнениями (12),

 (55)

и

. (56)

Они же являются и критериями-комплексами подобия, которые удобно записать в виде уравнения коэффициентов подобия (21), а также

 (57)

и

. (58)

Два последних уравнения (57) и (58) описывают связь между масштабами моделируе­мых объектов.

Через коэффициенты подобия геометрических форм можно перейти к количествен­ной оценке площадных границ аномальных по сравнению с окружающей средой полей напряжений. Для соблюдения условий (6) и (21) предстоят трудности с подбором эк­вивалентных материалов. При анализе результатов моделирования методом фотоупру­гости необходимо указывать, что количественные выводы отражают ситуацию упругой стадии деформации.

Известные сегодня схемы полей напряжений в складках и разрывах отражают с гео­логической точки зрения мгновенные картины, характерные для отдельных стадий раз­вития структур.

В принципе, поднятый в статье вопрос о соблюдении критериев подобия при модели­ровании тектонических процессов не нов. Было обращено внимание только на неболь­шой круг задач и процессов, которые решаются с привлечением физического моделиро­вания. Но эти задачи и виды моделирования наиболее распространены в геотектонике (см. таблицу и текст выше). На их базе или со ссылкой на экспериментальные работы строятся подтверждения ряда гипотез. Когда дело связано с соблюдением подобия форм и структур, чаще всего автоматически, подсознательно, выдерживаются геометри­ческие критерии подобия.

Таким образом, механизм развития структур, разнообразие структурных форм и закономерности их сочетания друг с другом получают наглядное объяснение в эксперименте, даже если теория подобия не всегда подведена и обоснована.

Вместе с тем объяснение явления не определяет полный объем исследований. Оно является необходимым, но недостаточным шагом. Полное научное исследование должно предсказывать явления и процессы. Моделирование в геотектонике с более строгим применением теории подобия и теории размерностей дает возможность количественно оценивать моделируемые процессы и развивающиеся структуры и не только объяснять, но и предсказывать их в натуре. Это особенно важно в связи с переходом на моделирование сложных тектонических процессов.

**ЛИТЕРАТУРА**

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

Гавич И.К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. М.: Недра, 1980. 353 с.

Гзовский М.В. Метод моделирования в тектонофизике. - Сов. геология, 1958, № 4, с. 53-72.

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

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

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

Кацауров И.Н. Механика горных пород. М.: Недра, 1981. 161 с.

Люстих Е.Н. Условия подобия при моделировании тектонических процессов. - Докл. АН СССР, 1949, т. 64, №5, с. 661-664.

Назаров А.Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1965.218 с.

Насонов И.Д. Моделирование горных процессов. М.: Недра, 1969. 118 с.

Покровский Г.И., Федоров И.С. Центробежное моделирование для решения инженерных задач. М.: Госстройиздат, 1953. 155 с. Рамберг X. Моделирование деформаций земной коры с применением центрифуги. М.: Мир, 1970. 223 с.

Резняков А.Б. Метод подобия. Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1959. 150 с.

Розовский Л.Б. Введение в теорию геологического подобия и моделирования. М.: Недра, 1969. 125 с.

Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1981. 447 с.

Шеменда А.И. Условия и методика физического моделирования процесса поддвига литосферных плит. - В кн.: Проблемы теоретической геодинамики и тектоника литосферных плит. М.: Ин-т океанологии АН СССР, 1981, с. 154-160.

Шнеерсон Б.Л. О применении теории подобия при геологическом моделировании. М.: Изд-во АН СССР, 1947, с. 94-106. (Тр. Ин-та теорет. геофизики; Т. 3).

Hubbert М.К. Theory of scale Models as Applited to the study of geologic stractures. - Bull. Geol. Soc. Amer., 1937,vol. 48, p. 1459.

1. \* Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. – М.: Наука, 1985. – С. 25–37. [↑](#footnote-ref-1)
2. 1 В гидродинамике используют число Фруда в виде  [Седов, 1981] [↑](#footnote-ref-2)