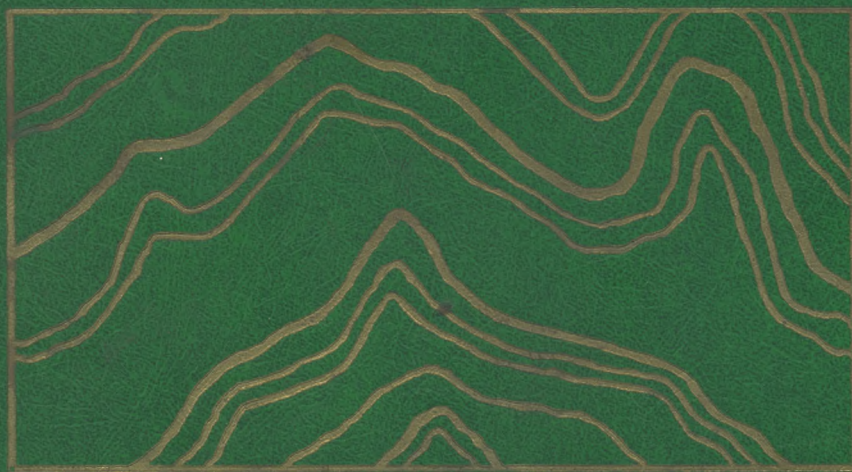


139
3-41
12.5087

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕКТОНИКА
В ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
И ПРИКЛАДНОЙ
ГЕОЛОГИИ



·НАУКА·

ЛИТЕРАТУРА

- Громин В.И. Оценка развития экспериментальной тектоники по публикациям. — Геотектоника, 1974, № 1, с. 124–127.
- Проблемы тектонофизики. — Тр. Первого Всесоюз. тектонофиз. совещ., 1957 г. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 364 с.
- Экспериментальное воспроизведение тектонических форм. — В кн.: Тектоника Сибири. М.: Наука, 1972, т. 5. Принципы тектонического районирования. Тектоническая терминология и систематика. Тектонические эксперименты, с. 165–220.
- Экспериментальная тектоника в решении задач теоретической и практической геологии. Всесоюз. симпоз.: Тез. докл. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1982. 185 с.

УДК 551.24.02

С.И. Шерман

ЭКСПЕРИМЕНТ В ГЕОТЕКТОНИКЕ И ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

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 немаловажен 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)

$$C_U = C_E C_L^3,$$

для моделирования на упругих средах: (2)

$$C_E = C_\rho C_g C_L,$$

для моделирования на пластичных материалах: (3)

$$C_\eta = C_\tau C_t,$$

где C — коэффициенты подобия: E — 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: статического 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 соблюдать прежде всего геометрическое подобие, что является обязательной предпосылкой подобия всех физических явлений:

$$\frac{L'_M}{L'_H} = \frac{L''_M}{L''_H} = \dots = \frac{L^i_M}{L^i_H} = C_L, \quad (4)$$

где L'_M, L''_M, L^i_M — сходственные размеры модели; L'_H, L''_H, L^i_H — 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.

$$\frac{v'_M}{v'_H} = \frac{v''_M}{v''_H} = \dots = \frac{v^i_M}{v^i_H} = C_v, \quad (5)$$

$$\frac{F'_M}{F'_H} = \frac{F''_M}{F''_H} = \dots = \frac{F^i_M}{F^i_H} = C_F, \quad (6)$$

$$\frac{P'_M}{P'_H} = \frac{P''_M}{P''_H} = \dots = \frac{P^i_M}{P^i_H} = C_P, \quad (7)$$

где v — скорость движения в сходственных точках в модели и объекте; F, P — сила и вес (давление) в сходственных точках в модели и объекте; C — коэффициенты подобия; $C_L; C_v; C_F; C_P$ — 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:

$$\frac{t'_M}{t'_H} = \frac{t''_M}{t''_H} = \dots = \frac{t^i_M}{t^i_H} = C_t. \quad (8)$$

Основные уравнения и критерии подобия при физическом моделировании в геотектонике

Методы	Основные свойства эквивалентных материалов	Определяющие параметры	Основные физические уравнения и критерии-комплексы	Критерии-комплексы по анализу размерностей	Основные уравнения коэффициентов подобия
Динамическое нагружение	Хрупкие и упругие	$E, \sigma, \rho, F, L, g, t, v$	$F = ma$ $P = mg$ $U = \frac{mv^2}{2}$ $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$ $\epsilon = \frac{l}{L}$	$\frac{E}{\rho g L} = \text{idem}$ $\frac{E}{\gamma L} = \text{idem}$ $\frac{F}{FL^2} = \text{idem}$ $\frac{L}{vt} = \text{idem}$ (критерий Струхаля) $\frac{v^2}{gL} = \text{idem}$ (критерий Фруда)	$C_\sigma = C_E;$ $C_E = C_\rho C_L C_g; C_E = C_\rho C_L;$ $C_E = C_\gamma C_L;$ $C_F = C_E C_L^2;$ $C_L = C_v C_t;$ $C_v = \sqrt{C_L C_g};$ $C_L = C_t^2 C_g; C_L = C_t^2$
	Пластичные	$\eta, t, L, \rho, \dot{\epsilon}, g, \tau, v$	$\tau = \eta \dot{\epsilon}$	$\frac{\tau}{\eta \dot{\epsilon}} = \text{idem}$ $\frac{\rho g L t}{\eta} = \text{idem}$ $\frac{\gamma L t}{\eta} = \text{idem}$ $\frac{v \rho L}{\eta} = \text{Re} = \text{idem}$ (число Рейнольдса)	$C_\tau = C_\eta C_g \dot{\epsilon}; C_\eta = C_\tau C_t;$ $C_\eta = C_\rho C_L C_t C_g;$ $C_\eta = C_\rho C_L C_t; C_\eta = C_L C_t;$ $C_\eta = C_v C_\rho C_L$
Центрифугирование	Хрупкие и упругие		$F = ma$ $P = mg$	$\frac{E}{\rho g L} = \text{idem}$	$C_F = C_\rho C_g C_{V_{об}}; C_F = C_\rho C_L^3 C_g;$ $C_F = C_\rho C_L^4 C_t^{-2}; C_E = C_\rho C_L C_g$

Пластичные	$\eta, t, L, \rho, g, a, v$	$\tau = \eta \dot{\epsilon}$	$\frac{L}{vt} = \text{idem}$ (критерий Стру- халя) $\frac{v^2}{gL} = \text{idem}$ (критерий Фруда) $\frac{\rho g L^2}{\eta v} = \text{idem}; \frac{\rho g L t}{\eta} = \text{idem}$ $\frac{v \rho L}{\eta} = \text{idem} = \text{Re}$ (число Рей- нольдса)	$C_\eta = C_\rho C_L C_t C_g;$ $C_L = C_t^2 C_g; C_L = C_v C_t;$ $C_\eta = C_v C_L C_\rho;$ $C_v = \sqrt{C_L C_g};$ $C_L = \sqrt{C_\eta C_v C_\rho^{-1} C_g^{-1}}$	
Фотоупругость	Оптически изотропные упругие	σ, E, F, L	$\epsilon = \frac{\sigma}{E}$ $\epsilon = \frac{l}{L}$	$\frac{\sigma}{E} = \text{idem}$ $\frac{F}{\sigma L^2} = \text{idem}$ $\frac{F}{EL^2} = \text{idem}$	$C_\sigma = C_E;$ $C_l = C_L;$ $C_F = C_g C_L^2;$ $C_F = C_E C_L^2$
Статическое нагружение	Упругие и пластичные	$P^*, \rho, g, L, t, \sigma_{\text{пр}}, \eta$	$P^* = \frac{F}{S}$ $P^* = \rho g L$	$\frac{\rho g L}{P^*} = \text{idem}$ $\frac{\rho g L}{\sigma_{\text{пр}}} = \text{idem}$ $\frac{P^* L}{\eta v} = \text{idem}$ $\frac{P^* t}{\eta} = \text{idem}$	$C_{P^*} = C_\rho C_g C_L; C_{P^*} = C_\rho C_L;$ $C_{\sigma_{\text{пр}}} = C_\rho C_g C_L; C_{\sigma_{\text{пр}}} = C_\rho C_L;$ $C_{P^*} = C_\eta C_v C_L^{-1};$ $C_\eta = C_{P^*} C_t;$ $C_{P^*} = C_F.$

Примечание. L — линейный размер; l — перемещение; t — время; m — масса; F — сила; P — вес; P^* — давление; S — площадь; U — кинетическая энергия; E — модуль Юнга; μ — коэффициент Пуассона; σ — нормальное и τ — касательное напряжения; $\sigma_{\text{пр}}$ — предел прочности; η — вязкость; ρ — плотность; γ — уд. вес; v — скорость; $V_{\text{об}}$ — объем; a — ускорение; g — ускорение силы тяжести; w — частота; ϵ — относительная деформация; $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации; C — коэффициенты подобия.

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

$$F = ma \quad (9)$$

или

$$P = mg \quad (10)$$

и

$$U = mv^2/2, \quad (11)$$

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 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:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (12)$$

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

$$\epsilon = \frac{l}{L}, \quad (13)$$

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

$$\tau = \eta \dot{\epsilon}, \quad (14)$$

связывающее касательные напряжения τ со скоростью относительной деформации $\dot{\epsilon}$ 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.

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 E , плотность ρ , линейный размер тела или расстояние L , ускорение силы тяжести g , сила F , время t , скорость v . На-

званные параметры будем считать главными и будем полагать наличие между ними функциональной связи. Базой для динамически подобных состояний будут уравнения (12),

$$\frac{E}{\rho g L} = \text{idem}, \quad (15)$$

$$\rho g = \gamma. \quad (16)$$

Тогда

$$\frac{E}{\gamma L} = \text{idem}, \quad (17)$$

$$\frac{F}{EL^2} = \text{idem}, \quad (18)$$

$$\frac{L}{vt} = \text{idem}, \quad (19)$$

$$\frac{v^2}{gL} = \text{idem}. \quad (20)$$

Уравнения (19) и (20) — критерии Струхала 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:

$$C_\sigma = C_E, \quad (21)$$

$$C_E = C_\rho C_g C_L, \quad (22)$$

$$C_E = C_\gamma C_L, \quad (22a)$$

$$C_F = C_E = C_L, \quad (23)$$

$$C_L = C_v C_t, \quad (24)$$

$$C_v = \sqrt{C_g C_L}, \quad (25)$$

$$C_L = C_t^2 C_g. \quad (26)$$

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 Струхала, который чаще используется для связи частоты w , линейной скорости v и пути L :

$$\frac{wL}{v} = \text{idem}. \quad (27)$$

Л.Б. Розовский [1969] рекомендует использовать критерий Струхала (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 Фру-

да (20)¹, которое после преобразований может быть записано как

$$\frac{L}{gt^2} = \text{idem} \quad (28)$$

и использовано в уравнении коэффициентов подобия (26).

Для моделей в гравитационном поле Земли

$$C_L = C_t^2. \quad (29)$$

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:

$$C_\tau = C_\eta C_\epsilon, \quad (30)$$

$$C_\eta = C_\tau C_t; \quad (31)$$

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 относиться: вязкость материала η , время t , размеры объекта L , ускорение силы тяжести g , плотность ρ , скорость деформации ϵ , напряжения σ , скорость потока v .

Базой для динамически подобных состояний будут уравнения

$$\frac{\tau}{\eta \dot{\epsilon}} = \text{idem}, \quad (32)$$

$$\frac{\rho g L t}{\eta} = \text{idem}, \quad (33)$$

$$\frac{\gamma L t}{\eta} = \text{idem}, \quad (34)$$

$$\frac{v \rho L}{\eta} = \text{idem} = \text{Re}. \quad (35)$$

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

$$C_\eta = C_\rho C_g C_L C_t. \quad (36)$$

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:

$$C_\eta = C_\rho C_L C_t. \quad (37)$$

¹ В гидродинамике используют число Фруда в виде

$$F_2 = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad [\text{Седов, 1981}].$$

Если учесть, что при моделировании тектонических процессов и структур C_η и C_t оцениваются числами 6–12 порядка, то можно пренебречь величиной C_ρ , поскольку плотность эквивалентных материалов изменяется в тех же пределах, что и плотность горных пород, или в крайнем случае на один порядок ниже. Тогда

$$C_\eta = C_L C_t. \quad (38)$$

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 $10^{-9 \div -12}$), 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 Х. 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 Х. 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

$$C_\sigma = C_\rho C_g C_L. \quad (39)$$

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 Х. Рамберг [1970, с. 55], ничтожен и в расчет не принимается.

В своих опытах Х. Рамберг отказывался от условия (29), описывающего зависимость между размерами моделируемых объектов и временем деформирования при $C_g = 1$, 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 Х. 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 земных

недр $F = P$, т.е. весу толщи горных пород. Рассматривается случай, когда сила тяжести играет роль деформирующей силы. Отсюда

$$F = P = mg = \rho V_{об} g. \quad (40)$$

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

$$F = ma = \rho V_{об} a. \quad (40a)$$

Подобие процессов будет соблюдено, если

$$\frac{F_M}{F_H} = \frac{\rho_M V_{об.М} a_M}{\rho_H V_{об.Н} g}. \quad (41)$$

Введя критерии-симплексы C_F , C_ρ , $C_{V_{об}}$, C_L , C_P , получим уравнения коэффициентов подобия

$$C_F = C_\rho C_g C_{V_{об}}, \quad (42)$$

$$C_P = C_m C_g, \quad (43)$$

$$C_m = C_{V_{об}} C_\rho = C_L^3 C_\rho, \quad (44)$$

$$C_F = C_\rho C_L^3 C_g, \quad (45)$$

$$C_F = C_\rho C_L^4 C_t^{-2}. \quad (46)$$

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

$$\frac{\rho g L^2}{\eta v} = \text{idem}. \quad (47)$$

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 Х. Рамберг для оценки C_t 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

$$C_\eta = C_v C_\rho C_L, \quad (48)$$

$$C_L = C_v^2 C_g^{-1}, \quad (49)$$

$$C_L = \sqrt{C_\eta C_v C_\rho^{-1} C_g^{-1}}. \quad (49a)$$

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 природы без учета параметра времени можно использовать критерий, приводимый И.Д. Насоновым [1969]:

$$a = g C_L, \quad (50)$$

где a — 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 природе.

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 натурального 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 фотоупругости 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:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}. \quad (51)$$

Распространение лучей в напряженной пластине происходит с различными скоростями в соответствии с величинами σ_1 и σ_2 , что приводит к оптическому сдвигу фаз и линейной разности хода. Разность хода в любой точке пропорциональна разности главных напряжений

$$\Gamma = Cd(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (52)$$

или максимальному касательному напряжению

$$\Gamma = 2Cd\tau_{\max}, \quad (53)$$

где Γ — разность хода; C — постоянная материала или оптический коэффициент напряжений; d — толщина пластинки.

Зная толщину исследуемой пластинки-среза d , оптическую постоянную C и оценив разность хода Γ по различию цветовой окраски и таблице соотношений цвета и длины волн, можно найти τ_{\max} .

Исходя из физической природы метода фотоупругости, 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

$$C_l = C_L. \quad (54)$$

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 являются величины L , σ , E , F , связанные уравнениями (12),

$$\frac{F}{\sigma L^2} = \text{idem} \quad (55)$$

и

$$\frac{F}{EL^2} = \text{idem}. \quad (56)$$

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

$$C_F = C_\sigma C_L^2 \quad (57)$$

и

$$C_F = C_E C_L^2. \quad (58)$$

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) предстоит 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. Поляризациино-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 многофазнослойной 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 Х. 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.
- Шнейерсон 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 M.K. Theory of scale Models as Applied to the study of geologic structures. — Bull. Geol. Soc. Amer., 1937, vol. 48, p. 1459.

УДК 551.24

Е.И. Паталаха

НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ ДИСЛОКАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

Автор этих строк, воздавая дань уважения лабораторному тектоническому эксперименту, полагает все же, что самый лучший (представительный) эксперимент — тот, что творит сама природа. А следовательно, лучший модельный результат — реальная тектоническая структура и самая лучшая экспериментальная тектоника — это структурная геология. Думаю, что в своей основе сложность экспериментальной тектоники состоит не столько в умении копировать с помощью эксперимента уже известный природный процесс, сколько в реконструкции и расшифровке самого процесса-оригинала методами обычной геологии. Иными словами, мы, как правило, лучше представляем себе как делать, нежели что делать.

В сказанном лишний раз можно убедиться на примере приводимого обсуждения, основанного на многолетних специализированных исследованиях дислокационных структур Казахстана.

Дислокационным называется процесс преобразования первичных форм залегания горных пород вследствие тектонических деформаций (складкообразования в самом широком смысле слова)¹. Дислокационный процесс, по существующим понятиям, крайне разнообразен, так же как разнообразны те геотектонические режимы, которые он сопровождает. Обычно выделяются этапы разрывообразования, этапы складкообразования и т.д. В отличие от существующих воззрений автор пришел к выводу, что главное содержание дислокационного процесса сводится в конечном итоге к перемещению блоков по "родоначальным" разломам и их приразломному смятию вследствие вязкого трения и сдвигового (односистемного) течения (параллельно плоскости разлома).

¹ За основу принята классификация складчатости [Паталаха, 1973], согласно которой для оротектонических сооружений фанерозоя характерной является шовная складчатость. Вот почему только на этом впервые обосновываемом типе сосредоточено внимание в настоящей работе.