

С.И.Шерман

Институт земной коры СО АН СССР, Иркутск

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТЕКТОНИКИ

Даны анализ современного состояния экспериментальной тектоники, обзор главных достижений в области физического и математического моделирования. Для повышения эффективности экспериментальных исследований и их использования в геодинамике, геотектонике, а также в практических вопросах рудной геологии намечены основные проблемные задачи: дальнейшая разработка теории подобия в отношении к тектоническим экспериментам, введение в нее собственно геологических критериев-комплексов; разработка методики и проведения комплексных экспериментов для параллельного и одновременного исследования структурообразования в литосфере и синхронно протекающих процессов; постановка опытов в условиях повышенных температур и давлений и другие более частные задачи.

Проблемы экспериментальной тектоники определяются общими задачами, стоящими перед геотектоникой. В настоящее время геотектонические исследования охватывают все более глубокие сферы Земли и вовлекают в анализ богатый комплекс синхронно протекающих геологических процессов: деформации и напряжения, движения коры, разрушение среды и сейсмичность, вулканизм и гидротермальную деятельность. Инструментальные средства, используемые в тектонике и геофизике, пока не позволяют непосредственно наблюдать формы деформаций и разрушений материала на глубинах в десятки и более километров, а длительность формирования структур настолько велика, что делает принципиально невозможным изучение их динамики в природе и корреляцию с развитием других синхронных процессов. Общая тенденция развития геотектоники корректирует и главные задачи, стоящие перед экспериментальной тектоникой. Они требуют введения дополнительных методических средств в экспериментальную тектонику, чтобы с ее помощью "заглянуть" в глубь пространства и "сократить время свершения", и, следовательно, сделать возможными наблюдения над сложными тектоническими явлениями и дать весомый материал для прогноза структурообразования и парагенетически связанных с ними событий.

© С.И.Шерман, 1991

ISBN 5-12-001738-X. Эксперим. тектоника  
и полевая тектонофизика. Киев, 1991.

Рассмотрим, насколько современное состояние дел в экспериментальной тектонике отвечает этим, сформулированным в общем виде, задачам. Сегодня преобладают два неравноценно развитых направления: физическое и математическое (механико-математическое) моделирование. Физическое моделирование занимает ведущее место и продолжает развиваться вширь. Проводится большое количество экспериментов прежде всего по механизму образования простых и сложных структур, изучается динамика развития структур, взаимоотношения между ними.

Работы по физическому моделированию по грубой классификационной схеме распадаются на несколько ветвей. Первая - исследование физических свойств горных пород и модельных материалов. Физические свойства горных пород исследованы подробно, при различных нагрузках, температурах и давлениях. Результаты сведены в многочисленные справочники. Свойства модельных материалов изучены недостаточно, и этому не придается большого значения. М.В.Гзовский и Д.Н.Осокина начинали моделировать на глине и желатине и тщательно изучили наиболее важные вязкостные свойства глины и оптические реакции желатина при нагружении. А.И.Шеменда подобрал и описал свойства гелей и композитных смесей, используемых при моделировании подвига литосферных плит и их антиподов - рифтовых зон [6]; К.Ж.Семинский убедительно показал изменение свойств бурой глины во времени и при нагружении, чем ограничил интерпретацию отдельных экспериментов [3].

Однако свойства модельного материала не изучаются в условиях повышенных температур и давлений, что ограничивает выводы по экспериментам и может исказить их. Неполное знание свойств модельных материалов накладывает существенные ограничения на интерпретацию экспериментальных данных. М.С.Патерсон [10] показал, что установленные лабораторным путем параметры нуждаются в поправках на всестороннее давление, температуру, а также на наличие поровых флюидов, летучих, химическое состояние вещества, размер зерен или кристаллов, предпочтительную кристаллографическую ориентацию.

Вторая крупная ветвь физического моделирования - воспроизведение геологических структур и механизмов их развития. Экспериментальные работы такого назначения получили очень широкое распространение. Здесь используются десятки методов и сотни различных приборов и приспособлений. Преобладают опыты с деформацией материала при комнатной температуре, атмосферном давлении и одностороннем дополнительном нагружении. Большое количество опытов сделано на центрифуге. В экспериментах используются хрупкие и пластичные материалы, а также композитные смеси.

Моделирование на центрифуге, широко применяемое в эксперимен-

тальной тектонике Х.Рамбергом, а в нашей стране В.Г.Гутерманом, А.М.Сычевой-Михайловой и другими раскрыло многие стороны механизмов развития структур в условиях действия массовых сил. Серия взаимосвязанных логической последовательностью по постановке конкретных задач экспериментов на центрифуге позволила В.Г.Гутерману [17] представить стройную картину тектогенеза, в частности происхождение грабенов и формирование сейсмофокальных зон, разработать разломно-магматически-изостатические модели развития структур земной коры.

Однако в последние годы в области тектонического моделирования нет экспериментов при высоких значениях давления и температуры. Исследования деформаций горных пород в условиях давлений до 20 кбар и температурах около 500–600 °С активно велись в конце 60 – начале 70-х годов В.И.Громиным, Г.Д.Ушаковым и другими под руководством И.В.Лучицкого. Сейчас эти работы практически прекращены. В то же время в экспериментальной петрологии и минералогии применяются установки с рабочим давлением 40 кбар и более [9]. Эти давления создаются в небольших камерах, мало пригодных для тектонического моделирования из-за ограниченного пространства. Проблема увеличения "пространства" для работы с большими моделями стоит и перед центрифугированием.

Третья крупная ветвь физического моделирования – моделирование физических процессов, происходящих в массивах горных пород, и их деформаций, для чего требуются более сложная аппаратура и сотрудничество различных специалистов. Основная часть таких работ ведется в ИФЗ АН СССР прежде всего для решения вопросов физики очага землетрясений. Сюда относятся исследование полей напряжений в различных геологических структурах, изучение акустической эмиссии, сопровождающей разрушение, изучение миграции флюидов в геологических структурах, особенности формирования конседиментационной складчатости и др.

Наиболее важное значение для геотектоники имеют работы по моделированию напряжений в геологических структурах. Исследования Д.Н.Осокиной, П.М.Бондаренко, Ш.Д.Фатхуллаева, Н.П.Гречешникова и других, опирающиеся на изучение моделей поляризационно-оптическим методом, внесли практически полное представление о распределении нормальных и касательных напряжений в окрестностях разломов, в складках продольного и поперечного изгибов, позволили промоделировать конкретные районы и рудоносные структуры [9]. Но всего этого еще недостаточно для тектоники. Нужна комплексность исследований.

В лаборатории тектофизики Института земной коры СО АН СССР,

экспериментальные работы по исследованию развития разрывов, выполняемые на специально разработанной установке "Разлом", информационно-измерительной системе тензостанций марки К-732 и акустическом комплексе АК-15 (производства ГДР) позволили проследить за стадийностью образования крупного разрыва в постоянном режиме нагрузки, перестройкой его инфраструктуры, динамикой поля напряжений и акустической эмиссией, сопровождающей разрывообразование. Комплексная работа выполнена коллективом авторов [7], каждая часть которой представляет самостоятельный эксперимент по конкретному тектоническому процессу или тектонической структуре. Все эксперименты проводятся на моделях из упруговязкопластичной глины при согласованных условиях и параметрах модели. Установлено, что до появления магистрального разрыва опережающие его развитие трещины формируются неравномерно. Поля максимумов и минимумов их плотности чередуются, располагаются по простиранию в пределах зоны динамического влияния. Абсолютные значения плотности трещин неодинаковы в каждом из крыльев разлома в определенный конкретный момент времени. Ко времени формирования магистрального разрыва крыло, к которому приложена нагрузка, будет более раздробленным. Структура зоны меняется стадийно при равномерной скорости деформирования, и в соответствии с изменением структуры ее ранговых перестроек изменяется нагрузка на модель. Таким образом, несмотря на стабильный характер энергетического источника и прилагаемых к модели сил, деформация в модели распределяется дискретно в соответствии с неравномерным развитием внутренней структуры области динамического влияния разлома.

Метод акустической эмиссии (АЭ), примененный в этих экспериментах, показал соответствие аппроксимирующей кривой распределения плотности импульсов АЭ, излучаемых развивающимся разломом, стадиям его развития, выраженным изменениями кривой нагрузка - деформация.

Параллельно изучено распределение полей сдвиговых деформаций и касательных напряжений в области активного динамического влияния среза. Их интенсивность также изменяется вкост разлома и по его простиранию.

В ходе тензометрического исследования деформации модельного материала в поперечном сечении по глубине зоны среза обнаружены явления миграции поля скоростей сдвиговых деформаций вкост разлома и снизу вверх. Миграции имеют колебательный характер.

Результаты этих и некоторых других экспериментов сопоставляются с данными полевых исследований [2]. Здесь необходимо обратить внимание на комплексный характер экспериментов и их следст-

вий для геотектоники. При постоянном тектоническом режиме, неизменном источнике напряжений и стабильном региональном поле напряжений крупные разломы развиваются неравномерно, а связанные с ними геолого-геофизические события в большинстве своем носят дискретный в пространстве и времени характер. В частности, под этим же углом зрения можно рассматривать эволюцию межплитных границ и их сейсмичность. При стабильной нагрузке, иначе — однотипном тектоническом режиме, формирование внутренней структуры межплитных разломов идет дискретно и синхронизируется с неравномерно протекающими сопутствующими актами. Комплексный подход к постановке опытов может явиться прообразом моделирования геотектонических режимов с широкой гаммой геолого-геофизических процессов (магматизмом, сейсмичностью и др.).

Среди физических экспериментов большой информативностью, особенно для изучения процессов в динамике, обладают методы аналогового моделирования. Серия одно- и двумерных задач на интеграторе успешно решена А.В. Лукьяновым [87].

Введение принципиально новых методов физического моделирования в тектонике могло бы открыть чрезвычайно много возможностей для более простого объяснения и более глубокого понимания геологических явлений. Эффектно и полезно для дела можно использовать моделирование в волновых полях для изучения формирования слоистых сред. Волновые поля, особенно стоячие волны, способствуют дифференциации неоднородных сред. В связи с развитием знаний о горизонтальной расслоенности литосферы нас перестают в ряде случаев устраивать устоявшиеся представления о формировании слоистой структуры геологической среды. В ультразвуковых полях, а в общем — в волновых полях широкого диапазона частот может быть смоделировано образование различного комплекса тектонических структур от складчатых до разрывных, в том числе в сочетании последовательных иерархических ступеней [87].

Влияние колебаний на геологические процессы несомненно, но совершенно не изучено. В моделях исследованы парадоксальные явления, обнаруженные с помощью вибраций жидкостей и твердых тел [47]. Твердые предметы, более плотные, чем жидкость, при достаточно интенсивных вибрациях сосуда всплывают, а относительно легкие, наоборот, тонут. Во всех случаях система под действием вибраций стремится занять положение, близкое к состоянию с максимальной потенциальной энергией.

Что могут дать подобные опыты геотектонике? Они могут помочь в расшифровке природы горизонтальной расслоенности реологически неоднородной литосферы, объяснении локальных явлений, связанных



с движением на большие расстояния обвалных масс во время землетрясений и некоторых других событий. В экспериментальную тектонику может быть включен новый метод физического моделирования. Опыты нуждаются в повторении и оценке использования их результатов для геотектоники.

Математическое и механико-математическое моделирование существенно расширило сферы своего приложения для геотектонических построений. Возросший интерес к математическому моделированию в тектонике обусловлен переходом от качественных методов изучения тектонических явлений к количественным, из которых механико-математические методы занимают одно из первых мест.

Существенное место занимают публикации по разрывам, напряженному состоянию, кинематике разломообразования. Характерно, что в большинстве случаев в этих расчетах разломы различного ранга представлены в виде одиночной трещины простой формы. Лица, занимающиеся геологическим картированием и полевыми методами изучения геологических структур, знают, насколько такое представление удалено от природы. В целом очень мало работ, посвященных моделированию сложных геологических объектов. Анализ состояния материала дает основание для определения наиболее перспективных направлений в математическом моделировании. К ним могут быть отнесены: 1) моделирование сложных геологических структур (грабен, горст, системы сдвигов – блатты), зон сочленений структур, нелинейных структур; 2) моделирование отдельных геологических структур в динамике развития их инфраструктуры (например, глубинных разломов от одиночных трещин до систем разнонаправленных трещин с определенным периодом развития); 3) моделирование взаимосвязей развития разрывных и пликтивных структур, в том числе моделирование стадийности и колебательного характера геологических процессов, протекающих в квазистационарном поле напряжений.

Здесь не затрагиваются работы собственно геофизические, посвященные моделированию вращения Земли, изостазии, гравиметрии, тепловому полю, магматизму, напряженному состоянию у горных выработок и др. В целом, в настоящее время выполняется достаточно большое количество работ по физическому и математическому моделированию в тектонике, но их результаты скромно используются в геотектонике и повседневной практической геологии.

Две главные причины лежат в истоках возникшей ситуации. Первая связана с частичным несовпадением запросов геотектоники (и в более широком плане – геодинамики) с конкретными задачами, решаемыми экспериментальной тектоникой. Геодинамика требует численных решений общих задач геотектоники, проверки многих из них физиче-

ским моделированием, оно же пока решает задачи структурной геологии. Мало экспериментов по исследованию структуры межплитных границ, нет физического моделирования конвекции, условий формирования конвекционных ячеек и образования плит на сфере, нет проверок гипотез о столкновении плит и о внутриконтинентальных структурах, связанных с этим столкновением, и некоторых других.

Вторая причина базируется на методах изложения результатов экспериментальных работ. Чаще всего – это только описание опытов, без проникновения в соответствующий раздел геотектоники. Одно из приятных исключений составляет книга В.Н.Шарапова, И.Г.Симбиревой и П.М.Бондаренко [5], в которой физическое моделирование полей напряжений и деформационных структур тесно вплетено в текст и является неотъемлемой частью общего геодинамического анализа режима развития региона. Но таких работ немного. От экспериментальной тектоники сегодня требуется помощь в восстановлении динамики геотектонических процессов, их количественного описания в пределах возможной точности, активного вклада в прогнозную часть геотектонических исследований. Излагая результаты опытов, надо показывать совершенство или несовершенство геотектонических построений. С помощью физических экспериментов можно было бы убедительно показать и несостоятельность ряда умозрительных геотектонических гипотез.

Выполнение актуальных работ смогло бы существенно поднять значимость экспериментов в тектонике. В этом заключается одна из основных задач – внесение более весомого вклада в развитие геотектоники и геодинамики в целом. Экспериментальная тектоника по своим возможностям может стать одним из главных методов геотектоники как науки.

Реализация главной цели связана с практическим решением ряда задач, образующих внутренние проблемы экспериментальной тектоники. Первая проблема состоит в изменении общего подхода к решению задач в экспериментальной тектонике. Подведя сегодня черту под сделанным, необходимо в дальнейшем требовать более строгого обоснования постановки конкретных опытов, условий эксперимента, принятых критериев подобия, подробного анализа результатов и обсуждения границ доверия к ним. Имеет смысл постепенно отказываться от моделирования только отдельных даже сложных структурных образований. Желательно сочетать моделирование структур и их систем с фиксированием простых (и сложных, если позволяют технические условия) сопутствующих процессов с целью изучения связей между развитием комплекса тектонических структур и синхронных явлений. Иными словами, ставится цель моделирования геотектонических режимов с параллельным решением многочисленных задач.

Для уменьшения многовариантности выводов при решении сложных задач желательно комплексировать два-три вида физического моделирования с вариантами математического (механико-математического) моделирования. Комплексирование методов обогатит конечные результаты. Конечные результаты экспериментальных решений необходимо не только качественно описывать, но и стремиться выражать в абсолютных или относительных количественных характеристиках, что упростит взаимную увязку выводов и главным образом их практическое использование.

Вторая внутренняя проблема экспериментальной тектоники определяется необходимостью дальнейшей разработки теории подобия и размерностей в приложении к тектоническому эксперименту. Сейчас подобие доказывается главным образом сходством (общностью) физического (физико-химического) процесса в модели и природе. Это основа основ подобия. Принимая во внимание сложность геологических процессов, можно утверждать, что здесь не всегда и не во всем существует полная автомодельность процессов на микро- макро- и мезоуровнях. Следует ввести в базу критериев подобия группу комплексных показателей, критериев - комплексов собственно геологической природы, которые характеризуют тектоническую специфику среды и объектов, парагенез геологоструктурных признаков. Так, М.А.Гончаров [8] для более отчетливого сравнения кинематики и динамики процессов "вынужденного" и "свободного" складкообразования ввел безразмерный параметр  $\alpha / r$ , который изменяет свое абсолютное значение в зависимости от упомянутого типа складкообразования. Он рекомендует такой показатель называть константой складчатости.

В.Г.Гутерман [4] при моделировании грабенов ввел условный критерий "прочности толщи на грабенообразование" или критическую деформацию грабенообразования  $\xi$ , которая показывает отношение амплитуд проседания  $q$  в момент появления первых трещин к ширине склона  $l$ , т.е.  $\xi = q/l$ . Эта величина была оценена по природным рифтам и в соответствии с ее значениями подбирался модельный материал. Здесь наглядный пример критерия подобия с глубоким геологическим содержанием.

Можно попытаться разработать показатели собственно геологической природы - интегральные показатели, которые будут характеризовать тектоническую специфику среды и объектов, парагенез геологоструктурных признаков. Интегральные показатели должны отражать изменение одной группы признаков в связи с другими и замещать их. Интегральными показателями могут быть комплексные параметры систем разломов, области динамического влияния разломов, интенсивность складчатости и др. Со временем "геологические" критерии-



комплексы и интегральные показатели образуют дополнительную и принципиально новую группу критериев подобия, отражающих эквивалентность отношений парагенезов структурно-тектонических явлений. Необходима дальнейшая разработка теории подобия и размерностей в приложении к тектоническому эксперименту.

Третья внутренняя проблема экспериментальной тектоники – техническая, заключающаяся в обеспечении и использовании современного оборудования, приборов и разработке ряда новых композитных материалов с широким диапазоном физико-механических свойств. Среди последних особое значение следует придавать прозрачности модельных материалов, чтобы можно было визуально следить за образованием структур.

Для усиления материальной базы нужны оригинальные, фактически по специальному заказу изготовленные приборы, на которых можно было бы работать с моделью размерами в десятки сантиметров и более при повышенных всесторонних давлениях и температурах.

Таким образом, современные проблемы экспериментальной тектоники в общем сводятся к переходу на решение наиболее актуальных задач геотектоники комплексными методами физического и математического моделирования, к переходу на большие по размеру рабочие модели, с использованием в опытах сложных реологических сред в условиях высоких давлений и температур, введению принципиально новых методов моделирования в волновых и вибрационных полях, совершенствованию оборудования и теории моделирования.

Решение названных проблем и вопросов расширит значимость и возможности моделирования и включит экспериментальную тектонику в число обязательных методов, без которых многие геодинамические построения не могут считаться полностью аргументированными.

1. Гутерман В.Г. Механизмы тектогенеза. – Киев: Наук. думка, 1987. – 172 с.
2. Лобачкая Р.М. Структурная зональность разломов. – М.: Недра, 1987. – 128 с.
3. Семиной К.Ж. Структурно-механические свойства глинистых паст как модельного материала в тектонических экспериментах. – Иркутск: Ин-т земной коры СО АН СССР, 1986. – Деп. в ВИНИТИ, 1986, № 5762-В 86.
4. Челомей В.Н. Парадоксы в механике, вызываемые вибрациями. – Докл. АН СССР. – 1983. – 270, № 1. – С. 62-67.
5. Шарпов В.Н., Симбирева И.Т., Бондаренко П.М. Структура и геодинамика сейсмофокальной зоны Курило-Камчатского региона. – Новосибирск: Наука, 1984. – 199 с.
6. Шеменда А.И. Условия и методика физического моделирования процесса поддвига литосферных плит // Пробл. теоретической геодинамики и тектоники литосферных плит. – М.: Ин-т океанологии АН СССР, 1984. – С. 154-161.
7. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю., Трусков В.А., Бабищев А.А. Моделирование механизма образования сейсмоактивных

- разломов в упруго-вязкой среде // Геология и геофизика, - 1985. - № 10. - С. 9-19.
8. Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. - М.: Наука, 1985. - 295 с.
  9. Эксперимент в решении актуальных задач геологии. - М.: Наука, 1986. - 430 с.
  10. Paterson M.S. Problems in the extrapolation of laboratory rheological data // Tectonophysics. - 1987. - 133, N 1-2. - P. 33-43.

УДК 551.24.02

В.Г.Гутерман, А.В.Михайлова

Институт геофизики им. С.И.Субботина АН УССР, Киев

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта АН СССР, Москва

### ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СТРУКТУР

Кратко изложено современное состояние тектонофизического моделирования, его цели, принципы, возможности и тенденции. Приведены примеры изучавшихся тектонофизических механизмов. Обсуждаются возможности понижения степени неоднозначности обратной тектонофизической задачи. Дана классификация тектонических моделей.

Первые попытки воспроизведения в лабораторных условиях тектонических структур относятся к середине XIX в. Эпизодически они продолжались и в течение последующих ста лет, но опыты выполнялись без специальной теоретической и экспериментальной базы и служили в основном для иллюстрации той или иной тектонической идеи. Методологическая база экспериментальной тектоники, прежде всего в виде элементов теории подобия, стала закладываться в 30-40-е годы XIX в. [11, 18, 19]. Начало систематическим экспериментально-тектоническим исследованиям в нашей стране положено в 1944 г. В.В.Белюсовым, а оформление тектонофизического научного направления можно связать с появлением основополагающих статей М.В.Гзовского [4, 5].

В настоящем обзоре делается попытка представить (по необходимости - кратко) современное состояние тектонофизического моделирования, его возможности, идеологию и тенденции.

Цель и принципы тектонофизического моделирования. Целью физического моделирования тектонических процессов и структур является установление механизмов тектогенеза, т.е. способов, видов силовых воздействий на определенные толщи, массивы, блоки горных пород или целые геосферы, и вызываемые этими воздействиями деформированное и напряженное состояние соответствующих объектов. До-

© В.Г.Гутерман, А.В.Михайлова, 1991

ISBN 5-12-001738-X. Эксперим. тектоника и полевая тектонофизика. Киев, 1991.