**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ**

**ТЕКТОНИКИ[[1]](#footnote-1)\***

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 приложении 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 натуре 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.

Рассмотрим, насколько современное состояние дел в экспериментальной тектонике отвечает этим, сформулированным в общем виде, за­дачам. Сегодня превалируют 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 поддвига 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, в 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 экспериментальной 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 [6] 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 исследования полей напряжений в различных геологических структурах, изучение акустической эмис­сии, сопровождающией 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. Гречишникова 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. Но всего этого еще недостаточно для тектоники. Нужна комплексность иссле­дований.

В лаборатории тектонофизики 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 деформированиями 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, деформации в модели распределяются 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 вкрест 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 вкрест оси 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 следствий 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 о 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 друхмерных задач на интеграторе успешно решена А.В. Лукьяновым [8].

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 [8].

Влияние колебаний на геологические процессы несомненно, но совершенно не изучено. В моделях исследованы парадоксальные явле­ния, обнаруженные с помощью вибраций жидкостей и твердых тел [4]. 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 геологически неоднородной литосферы, объяснении локальных явлений, связанны с движением на большие расстояния обвальных 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 oдно 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 натуры. 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 пликативных 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, граниметрии, 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, решаемой экспериментальной тектоникой. Геодинамика требует численных решений общих задач геотектоники, проверки многих из них физическим моделированием, оно же пока решает задачи структурной геоло­гии. Мало экспериментов по исследованию структуры межплитных гра­ниц, нет физического моделирования конвекции, условий формирования конвекционных ячей 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 к синхронных явлений. Иными сло­вами, ставится цель моделирования геотектонических режимов с па­раллельным решением многочисленных задач.

Для уменьшения многовариантности выводов при решении сложных задач желательно компенсировать два-три вида физического модели­рования с вариантами математического (механико-математического) моделирования, Компенсирование 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 натуре. 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 мегауровнях. Следует ввести в базу критериев подобия группу комплексных показателей, критериев - комплексов собственно геологи­ческой природы, которые характеризуют тектоническую специфику среды и объектов, парагенез геолого-структурных признаков. Так, М.А. Гончаров [8] для более отчетливого сравнения кинематики и ди­намики процессов "вынужденного" и "свободного" складкообразования ввел безразмерный параметр σt/τ, который изменяет свое абсолют­ное значение в зависимости от упомянутого типа складкообразования. Он рекомендует такой показатель называть константой складчатости.

В.Г. Гутерман [1] при моделировании грабенов ввел условный критерий "прочности толщи на грабенообразование" или критическую деформацию грабенообразования ξ, которая показывает отношение амплитуд проседания *af* в момент проявления первых трещин к ширине склона *l*, т.е. ξ = *af* /*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 геолого-­структурных признаков. Интегральные показатель должен отражать изменение одной группы признаков в связи о 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.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Гутерман В.Г. Механизмы тектогенеза. - Киев; Наук, думка, 1987. - 172 с.

2. Лобацкая Р.М. Структурная зональность разломов. - М.: Недра, 1987. - 528 с.

3. Семинский 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. Шарапов В.Н., Симбирева И.Г., 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 тектоника литосферных плит. - М.: ин-т океано­логии АН СССР, 1981, с. 154-161.

7. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо Б.Ю., Трусков В.А., Баби­чев 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. - 295с.

9. Эксперимент в решении актуальных задач геологии. - М.: Наука, 1986. - 430с.

10. Paterson M.S. Problems in the extrapolation of laboratory rheological data // Tectonophysics. - 1987. - 133. № 1-2. - Р. 33-43.

1. \* Экспериментальная тектоника и полевая тектонофизика. – Киев, 1991. – С. 3–12. [↑](#footnote-ref-1)