

Вечно живая кора

Вы не можете видеть движение так, как вы видите структуру, т.е. в виде осязаемого со всех сторон трехмерного явления. Это движение надо воссоздать мысленно, воссоздать так, чтобы исторически связать сохранившиеся доказательства процесса и, наконец, подсказать его образом.

Эмиль Арган

М.Г.Леонов

Пляшущий мост

В двадцатых числах мая 2010 г. мир облетела сенсационная новость: огромный железобетонный мост через Волгу в городе Волгограде «заплясал» (рис.1). По всей его длине прошли волны с вертикальным размахом колебаний в 1—1.5 м, которые были видны невооруженным глазом. Волна шла от одного конца моста до другого, машины и пешеходов подбрасывало в воздух. Через некоторое время колебания прекратились. Мост пришел в свое естественное состояние, и специалисты приступили к изучению феномена. Каково же было их удивление, когда не удалось обнаружить ни малейших поврежденных конструкций — ни трещин, ни разрывов, ни каких-либо других следов деформации. Чудо, да и только!

При этом все дружно стали говорить об ошибках в проектировании, о нарушении технологий... Но! Если в «теле» моста при столь масштабной общей деформации не возникло никаких нарушений, то, значит, он спроектирован если не безупречно, то по крайней мере технически грамотно. И если, как это сейчас предлагается многими, ввести в конструкцию какие-либо дополнительные элементы, якобы ее укрепляющие, то не нарушится ли единство всего сооружения, не снизится ли его сопротивляемость внешним воздействиям?



Михаил Георгиевич Леонов, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией тектоники консолидированной коры Геологического института РАН. В 2005—2009 гг. — директор института. Область научных интересов — структура и тектоническая эволюция земной коры континентов, от ранних этапов ее становления до новейшей тектоники. Неоднократно публиковался в «Природе».

Вопрос нуждается в серьезном анализе, и задача эта для инженеров. Здесь же, не вдаваясь в рассмотрение причин явления, подчеркну главное: *произошла деформация твердого тела без нарушения внутреннего единства объема, монолитности, или, как принято говорить, без нарушения сплошности.*

А теперь попробуем представить себе земную поверхность, образованную твердыми горными породами, которая вдруг, как морская гладь, пойдет волнами. Кажется невероятным? Однако ничего невероятного в этом нет. Хорошо известны так называемые приливные волны, возникающие в земной коре и мантии под влиянием взаимодействий в системе Земля—Луна. Такие изгибы поверхности фиксируются приборами, но простым глазом не видны — деформация идет очень медленно на огромных пространствах. Амплитуда же волн невелика (30—60 см). А можно ли увидеть короткопериодные волны, пластически деформирующие поверхность земли или объемные монолитные объекты?

Оказалось, что можно, но очень редко. Во всяком случае, мне известны только два подобных примера. Задолго до феномена Волгоградского моста, в 80-х годах прошлого столетия, в горах Тянь-Шаня я наблюдал необычное явление. Выходя после маршрута в одну из речных долин, пересекающих Гиссарский хребет, наш небольшой отряд расположился на цокольной (сложенной коренными кристаллическими породами) речной террасе. Вдруг раздался глухой рокот, в глубине ущелья посыпались камни, и на мгновение мы потеряли ориентировку в пространстве, а когда все стихло, стало ясно — землетрясение! Мы замерли в ожидании афтершоков, но произошло удивительное: по поверхности террасы прошла волна высотой 20—30 см, совершенно бесшумно, и земная твердь на мгновение превратилась в пластичную субстанцию. Иначе как бы она могла



Рис.1. «Пляшущий» мост (фото с телеэкрана).

образовать волнообразные изгибы? А еще через мгновение поверхность террасы опять стала плоской и абсолютно ровной. И никаких следов деформации! Несколькими годами позже я наткнулся на описание аналогичного события в одной из книг знаменитого французского вулканолога Гаруна Тазиева. На территории США, в подземном бункере сейсмической станции, кинокамера, работавшая в автоматическом режиме, во время землетрясения зафиксировала волнообразное движение поверхности бетонного пола.

Последующее изучение бетона не показало никаких видимых нарушений монолитности. Движения были спровоцированы сейсмическими процессами. Они фиксировали землетрясение, но также не привели к образованию хрупких деформаций — ни трещин, ни разрывов. Как волны в воде не оставляют никаких следов, так и тут — никакого внешнего эффекта. Подобные явления теперь, после случая в Волгограде, можно называть *феноменом пляшущего моста*.

Но какое отношение эти несомненно интересные события имеют к геологии и к той проблеме, которая обозначена в заглавии статьи? Оказалось, самое непосредственное. Сопоставление вышеупомянутых наблюдений заставило задуматься о существовании объемной, или 3D (от англ. Three Dimensional), подвижности массивных и твердых кристаллических пород земной коры. Анализ опубликованных данных показал, что для такого вывода имеются реальные предпосылки, и когда мы стали изучать горные породы стабильных областей Земли (в пределах так называемых континентальных плит), то, вопреки распространенному мнению об их жесткости и хрупкости, оказалось, что их кристаллический фундамент (консолидированная кора) — очень подвижная субстанция [1]. В определенных геодинамических обстановках и некотором агрегатном состоянии вещества она приобретает свойства вязкой жидкости и ведет себя по законам течения жидких тел.

Что такое консолидированная кора

Земля имеет оболочечно-концентрическое строение. Выделяются земное ядро, мантия, кора, гидросфера и атмосфера. Понятие «земная кора» в 1835 г. ввел шотландский геолог Ч.Ляйель, который определил кору как поверхностные, доступные прямому наблюдению части нашей планеты. Позднее (например, в работах Дж.Дена и А.Гейке) кора рассматривалась как совокупность горных масс, охлажденных в процессе эволюции Земли. Определенность понятие приобрело в 1909 г., когда югославский геофизик А.Мохоровичич в недрах Земли, примерно в 20—60 км от поверхности, обнаружил раздел (впоследствии названный его именем), характеризующийся резким, скачкообразным изменением скорости распространения сейсмических волн. Раздел отделяет породы корового слоя от вещества верхней мантии. С этого момента принято считать, что земная кора включает совокупность осадочных и кристаллических пород, расположенных выше границы Мохоровичича.

В начале прошлого столетия появилось представление о консолидированной коре как о самостоятельной геологической оболочке. Классик геологии Э.Арган назвал породы фундамента «отвердевшими». Другой классик геологической науки, немецкий ученый Г.Штилле, определял консолидированную кору как верхнюю часть литосферы, утратившую способность к пластическим деформациям. В то же время он указал на наличие особого механизма образования структур в ее пределах и назвал его «тектоникой разрыхления». Это, как мы увидим впоследствии, очень важный тезис. Французский геолог Ж.Гогель предложил выделить тектонику чехла и тектонику фундамента, различающиеся формами деформационного процесса.

Сейчас консолидированная кора рассматривается как совокупность горных пород, формирующих оболочку, отличающуюся по составу, строению и физическим свойствам от перекрывающих (плитный чехол) и подстилающих (породы нижней коры и верхней мантии) образований литосферы. Породы верхней коры претерпели складчатость, метаморфизм и гранитизацию, и эти процессы в совокупности привели к консолидации, или, как часто говорят геологи, к кратонизации (от др. греч. *кратос* — «сила, крепость») горных масс. Зачастую консолидированную кору отождествляют с гранитно-метаморфическим слоем, который слагает фундамент различных геологических провинций в пределах континентов (рис.2). Океаническая кора в состав этого слоя, согласно приведенным понятиям, не входит.

Как видно из перечисленных выше определений, главными свойствами консолидированной коры (верхняя, доступная для наблюдения ее часть названа фундаментом) считаются ее жесткость, хрупкость и неподатливость пластическим деформациям. Континентальная земная кора

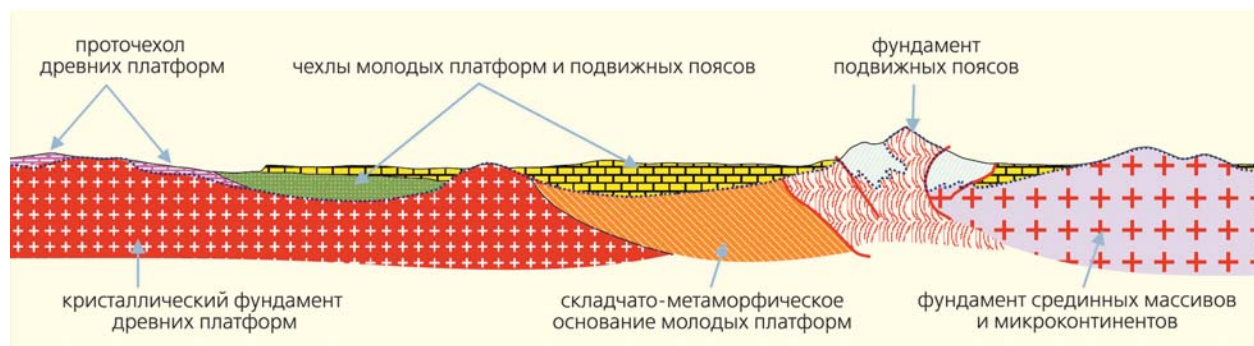


Рис.2. Различные типы фундамента континентов.

(в отличие от океанической, более тонкой и подвижной) всегда считалась оболочкой склеротизированной, способной ломаться или образовывать изгибы большого радиуса кривизны. Ее структура представлялась преимущественно разломно-блоковой, а механические свойства — отвечающими свойствам хрупко-упругого тела. Другими словами, породам консолидированного слоя процесс течения строго противопоказан, что и подчеркивалось приведенными выше высказываниями Лайеля, Штилле, Гогеля.

Впрочем, деформации, свидетельствующие о течении горных пород, геологам давно и хорошо известны. Но они обычно проявлялись в породах глубинных, разогретых зон Земли и, следовательно, расплавленных или термально пластифицированных (рис.3). Здесь же речь пойдет о деформациях, произошедших в «холодной», верхней части корового слоя и на «холодной» стадии эволюции, при температурах, не превышающих 100—200°C. В таких условиях горные породы не могут быть пластифицированы термически в сколько-нибудь заметной степени.

Почему же важно изучать именно земную кору, особенно кору континентов? Прежде всего

потому, что мы на ней живем, потому, что в ее строении и составе законсервированы процессы, некогда происходившие в глубинах нашей планеты, в более глубоких слоях и оболочках, недоступных в настоящее время для прямого наблюдения. Внутрь Земли мы особенно углубиться не можем. Самая глубокая скважина, пробуренная на Кольском п-ове, чуть более 12 км. Никто и никогда кору целиком не проходил и в мантию не заглядывал.

О глубинных оболочках Земли (мантии и ядра) существуют определенные представления, основанные на изучении магматического материала, вынесенного во время вулканических извержений, на данных дистанционных методов (сейсмической томографии и др.), на интерпретации результатов физического и расчетного моделирования. А верхнекоровый слой можно изучать непосредственно геологическими методами. Кроме того, в земной коре сосредоточены основные полезные ископаемые, так же, как в яблочной кожуре сосредоточены витамины. Если продолжать аналогию, можно сказать, что наша планета вообще похожа на яблоко. Внутри все сочное, мягкое, а сверху подсыхая кожа.



Рис.3. Складки течения. Слева — в гнейсах Центрального Французского массива; справа — в мигматитах Шаражилгайского массива (Прибайкалье).

Объемная подвижность и течение кристаллических пород

Одним из первых о масштабном пластическом течении горных масс консолидированного слоя заговорил уже упоминавшийся швейцарский ученый Арган. В 1922 г. на 13-м Международном геологическом конгрессе он изложил концепцию тектонического течения гигантских объемов земной коры на Азиатском континенте и нарисовал его траектории [2]. Доклад вызвал огромный интерес, но со временем поднятая Арганом проблема как-то позабылась. Снова интерес к ней возник в 60—70-х годах прошлого столетия. Появилась череда публикаций, касающихся пластической деформации кристаллических пород. У нас в стране на это явление, по-видимому, впервые обратил внимание Г.Д.Ажгирей, который показал, что поверхность гранитных массивов центрального ядра Большого Кавказа смята в складки, т.е. деформирована пластически [3]. Среди геологов возникла бурная дискуссия, может или не может такое быть? Чтобы в складки сминались массивы жестких кристаллических пород? Мнения разделились — от восхищения сделанным открытием до полного его неприятия. Примерно в то же время английский ученый, профессор Натальского университета (ЮАР) Л.Ч.Кинг объяснил формирование современного рельефа материков за счет объемного течения кристаллического фундамента, или реидной (от греч. *реоc* — «течение, поток») деформации [4]. Было много и других работ на эту тему, но всплеск интереса вновь оказался недолговечным, и отдельные (хотя и очень интересные) наблюдения не вышли на уровень общей парадигмы и остались как бы «за кадром» общего внимания.

В 70—80-х годах прошлого столетия разработку методических проблем пластического течения горных масс в нашей стране возглавил сотрудник Геологического института РАН (ГИН) А.В.Лукьянов, который обобщил сделанные им натурные наблюдения и данные физических экспериментов [5]. Он возглавлял Секцию структурной и экспериментальной геологии Межведомственного тектонического комитета, в работе которой участвовали многие известные российские ученые — специалисты в области тектоники, структурной геологии и моделирования.

В начале 90-х годов в ГИН РАН была создана специализированная лаборатория. В ее задачу входило изучение тектоники консолидированной коры в различных регионах Евразии: в Карелии и на Тянь-Шане, в Забайкалье и Монголии. Был обобщен и мировой опыт исследований. В течение теперь уже двух десятилетий получен богатый фактический материал, который неопровержимо свидетельствует: кристаллические горные породы могут вести себя как вязкая жидкость и могут течь в холодном твердом состоянии. Течение зачастую захватывает гигантские объемы горных масс са-

мого различного возраста, и при этом формируются специфические структурно-тектонические ансамбли. Благодаря им мы можем реконструировать процесс тектонического течения.

Появление таких данных вызвало удивление и споры, несмотря на наличие убедительных аргументов, не прекращающиеся до сих пор. Большую роль в этом играет вполне естественная (иногда даже полезная) косность человеческого мышления: «Я не видел — значит, этого нет. Где-нибудь, может, и есть, но только не у нас...». Был такой случай. Я делал доклад о тектонике консолидированной коры в одном из институтов. Говорил о течении кристаллических пород, о формировании соответствующих структур в земной коре, приводил примеры из разных регионов Земли, в том числе и по региону, который изучался геологами данного института.

Один из выступающих в прениях высказал сомнение в достаточной обоснованности моих выводов. Я решил сослаться на мнение авторитетов и сказал:

— Но Л.Кинг на ряде континентов — в Южной Африке, Австралии и в других регионах — установил подобное явление.

— В Австралии?.. Почему бы и нет...

— И на Кавказе Г.Д.Ажгирей описал соответствующие структуры...

— На Кавказе... возможно...

— И мы установили в вашем регионе...

— Нет, нет! Здесь такое явление, безусловно, отсутствует...

Значительная часть жизни континентов со сформированной консолидированной корой (молдых и древних платформ, срединных массивов) приходится на стадии формирования чехла (плитную) и постчехольную (время спокойного тектонического режима). Поведение кристаллического фундамента в периоды формирования чехла и внутриплатформенного тектогенеза долгое время оставалось недостаточно изученным, так же как и механизмы структурно-вещественной переработки пород, обеспечивающие внутреннюю подвижность фундамента на условно жесткой стадии их существования. Тем не менее имеются факты, показывающие, что фундамент платформ не абсолютно жесткий. И на платформенном этапе он обладает значительной подвижностью, а породы основания в процессе активизации испытывают структурные и структурно-вещественные преобразования. Но как это можно доказать?

Один из признаков, позволяющий нам говорить о том, что порода становится пластичной, — изгибание поверхности пенеплена (от лат. *раене* — «почти» и англ. *plain* — «равнина»), слегка волнистой денудационной равнины, срезающей дислоцированные породы различного состава и генезиса под один общий уровень. В результате деформации пенеплен изгибается, образуя иногда очень сложные складчатые формы (рис.4, 5).

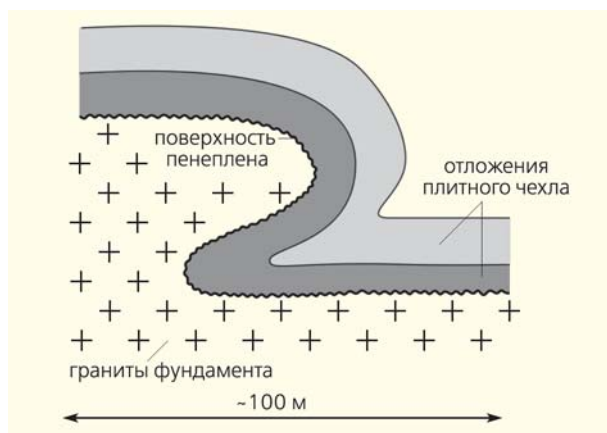


Рис.4. Изгиб поверхности пенеплена и перекрывающих слоев в Скалистых горах [6].

Исходя из определения пластической деформации (изменение объема или формы без разрыва сплошности), для того чтобы породы фундамента изменили форму залегания и чтобы их верхняя, первоначально субгоризонтальная, поверхность изогнулась (образовала складку или купол), или возникли иные формы, отражающие объем-

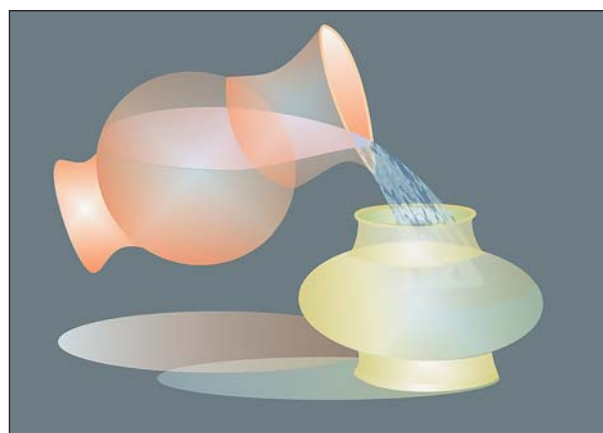


Рис.6. Чтобы изменить форму тела, надо придать ему объемную подвижность.

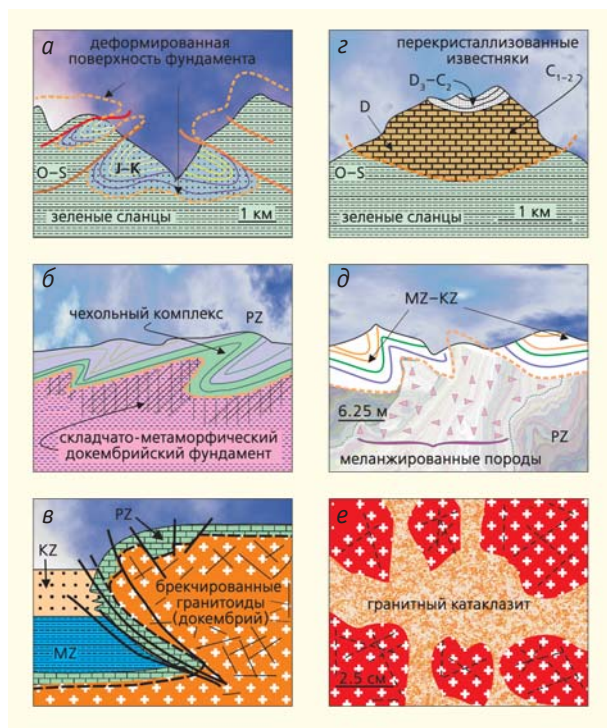


Рис.5. Деформация поверхности пенеплена и механизмы структурно-вещественной переработки горных пород, обеспечивающие их грануляцию и объемную подвижность. а — пластическая деформация; б — хрупкая микросколовая деформация; в — хрупкая макросколовая (блоковая) деформация; г — динамическая рекристаллизация; д — меланжирование; е — брекчирование и катаклаз.

ную подвижность пород консолидированной коры, должно произойти внутреннее перераспределение вещества, связанное с перемещением в пространстве отдельных его составляющих — деформируемых пород на макро- мезо- или микроуровне. Или сами эти составляющие должны изменить форму. Но, как бы то ни было, для того чтобы «перелить» некое вещество из одного сосуда в другой, ему необходимо придать объемную подвижность (рис.6).

Каковы же механизмы деформации, обеспечивающие объемную (3D) подвижность горных масс? В настоящее время можно уверенно говорить по крайней мере о шести способах структурно-вещественной переработки горных пород (рис.5). Примечательно, что все эти механизмы приводят к *грануляции* вещества, т.е. к состоянию, когда оно перестает быть монолитным и превращается в скопление отдельных кусков, обломков, зерен, связи между которыми ослаблены и становятся меньше, чем связь внутри гранул.

Гранулированные среды могут вести себя как твердые или как жидкие тела, или даже как газобразные. Они обладают отличными от нефрагментированных объектов электро- и теплопроводностью, характером прохождения сейсмических волн, особенностями передачи напряжений и др. Изучением поведения подобных субстанций занимаются специальные направления науки — механика гранулированных сред и мезомеханика. Не вдаваясь в детали, отмечу, что для рассматриваемой здесь темы важны прежде всего две вещи. Во-первых, фрагментированные вещества могут приобретать свойство сверхтекучести. Во-вторых, переход пород в гранулированное состояние в условиях деформации сдвига приводит к увеличению объема материала (дилатансии*), что также способствует перемещению вещества и созданию новых структурных форм.

* Явление дилатансии открыто в 1885 г. ирландским инженером-физиком О.Рейнольдсом.

Процессы течения, которые проявлялись в геологическом прошлом или идут в настоящее время, непосредственно наблюдать мы не можем. Они чрезвычайно медленны. Но признаки, по которым можно установить тектонические современные или палеопотоки, существуют. Во-первых, это изгибы поверхности пенепленов. Во-вторых — наличие определенных маркеров, указывающих на относительное перемещение элементарных частиц тела. Обнаружение таких маркеров, к сожалению, задача очень непростая.

Рассмотрим пример. Пересыпем сахарный песок из одной емкости в другую. Песок ведет себя как жидкость — он течет. Но мы не видим следов течения, так же, как не видим их и в первой емкости. А ведь песок туда тоже кто-то насыпал. Однако когда осуществляется течение, в веществе происходит сепарация по составу, крупности зерна и др. Примеси «отжимаются» и локализуются в виде полос, линз и скоплений различной формы. Порода может обесцветиться за счет выноса ряда компонентов либо, напротив, приобрести окраску (например, красноватую за счет выделения окислов железа). По относительному расположению частиц можно реконструировать процесс тектонического течения горных пород (рис.7).

Интересно отметить, что течение и в древних кварцито-песчаниках возрастом около 1.7 млрд лет, и в молодых толщах ледниковой морены возрастом 10—12 тыс. лет осуществлялось по сходному сценарию, так как и те и другие принадлежат к категории гранулированных сред.

Но существуют и иные признаки некогда проявившегося или проявляющегося в настоящее время течения горных масс — например, деформация отдельных составляющих породы (галек, обломков, остатков ископаемой фауны, прослоев и др.), а также специфические структурные формы и формы рельефа (рис.8). Эти структуры изучались в толщах пород различного возраста — от 1.5—2 млрд лет до практически современных; от древних метаморфических комплексов Балтийского щита до отложений четвертичного оледенения в Центральном Поволжье (рис.9).

Один из впечатляющих примеров тектонического течения — постледниковая (моложе 10 тыс. лет) деформация сложенных древними докембрийскими породами бараньих лбов — заглаженных округлых выступов рельефа, которые сформировались под действием ледового покрова (рис.10). Узкая (1—7 км) и протяженная (до 200 км) одна из зон Балтийского щита зажата между двумя крупными блоками (Карельским на юге и Беломорским на севере) и характеризуется чрезвычайно напряженными деформациями пластического течения. Бараньи лбы образованы крепкими кристаллическими породами, одновременно представляющими собой и тектонические будины (части разорванных пластов). Они имеют каплевидную форму с длинной осью, вытянутой по направле-

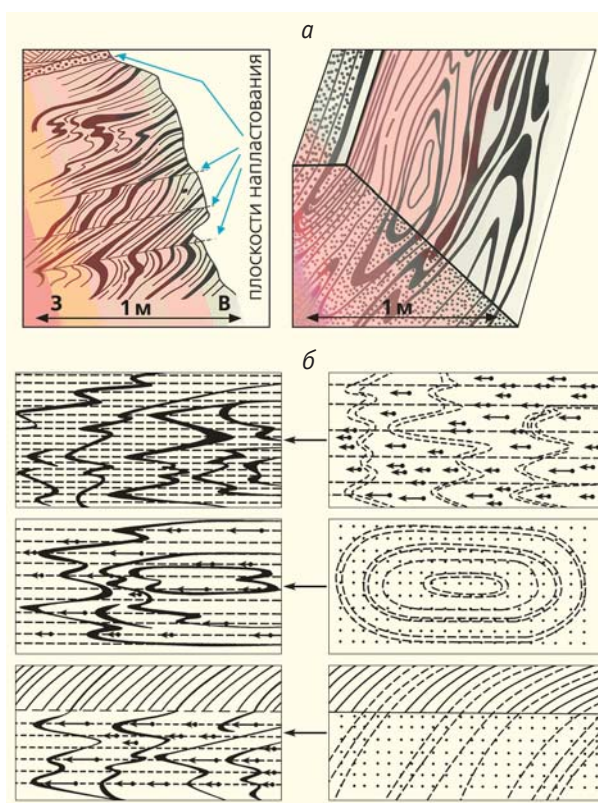


Рис.7. Выделения гематита в кварцито-песчаниках прото-платформенного чехла Карельского массива (возраст ~1700 млн лет), фиксирующие перемещение частиц породы в пространстве, и образование колчановидных «складок» (а) и различные варианты фиксации тектонического течения (сверху вниз): изгибание плоскостей кливажа, деформация колец Лизиганга, фиксация субслоистого течения (б).

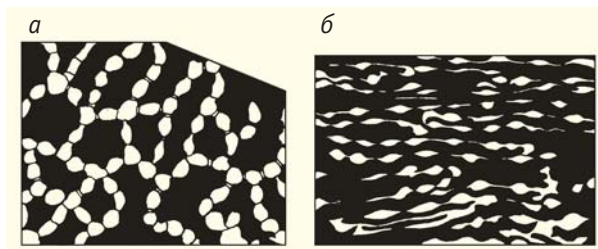


Рис.8. Пластическое растекание колонии кораллитов: а — недеформированный объем; б — деформированный объем. Рисунок по фото В.Л.Лелешуса.

нию зоны, и разорваны системой разломов и трещин. Поперечные рвы — миниграбены — еще не успели заполниться обломочным материалом.

Все наблюдения указывают на то, что деформации фиксируют общее пластическое течение. Оно проявляется в результате растягивающих усилий, направленных вдоль зоны, и имеющих очень молодой возраст. Изучение структуры и форм рельефа также указывает на практически

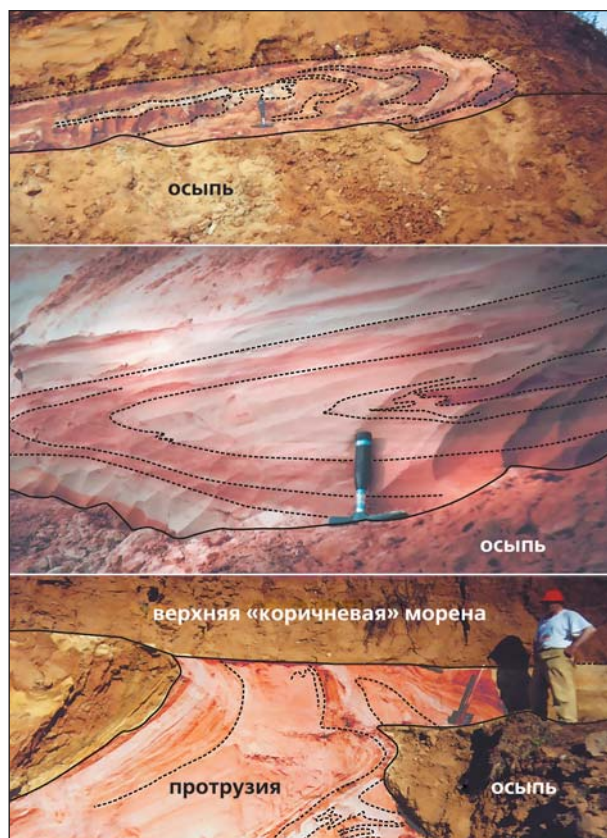


Рис.9. Деформации тектонического течения в моренном комплексе Центрального Поволжья.

современные движения земной коры региона. Небольшие грабены, рассекающие гигантские будины горных пород в зоне пластического сдвигового течения, наблюдались и на Тянь-Шане (рис.11).

Получается, что породы древнего фундамента и ледниковые отложения ведут себя одинаково? В известной степени да, если речь идет о гранулированной структуре.

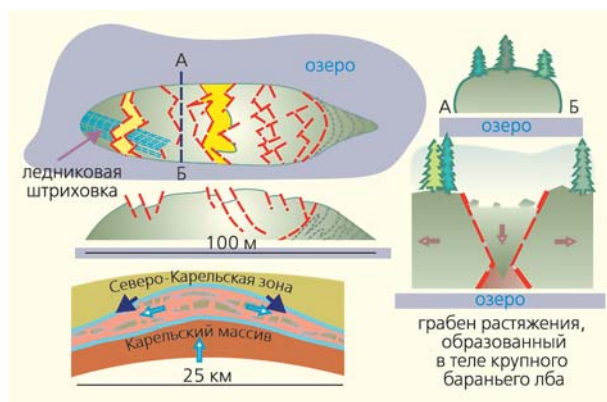


Рис.10. Деформация бараньих лбов — признак постледникового продольного тектонического течения докембрийских масс в северной Карелии.

Структуры протыкания и тектонические потоки

Если породы кристаллического фундамента, как было показано, обладают объемной подвижностью, то, очевидно, эта подвижность должна отражаться в специфических структурных формах земной коры, в каких-то геологических объектах, доступных для изучения. И действительно, такие природные тектонические ансамбли существуют. Они представляют собой геологические тела, во внутреннем строении которых и в их взаимоотношениях с окружающими породами сохранены признаки их связного перемещения в пространстве в виде вертикальных (диапиров, вертикальных протрузий) и субгоризонтальных (горизонтальных протрузий) тектонических потоков, как бы «вмороженных» в земную кору.

Диапиры. Термины «диапир» и «диапиризм» (от греческого *diapirein* — «протыкать») ввел румынский геолог Л.Мразек в 1926 г. для обозначения соляных штоков, которые развиваются в сводах антиклиналей и протыкают перекрывающие соль осадочные отложения. Но диапировая тектоника свойственна и более глубоким горизонтам земной коры и тектоносферы в целом. Диапиризм — яркий и показательный пример пластичности и подвижности огромных объемов вещества на различных глубинах тектоносферы. С ним связаны процессы тектогенеза различного масштаба — от формирования гигантских геотуморов (вздутий — результата изменения объемов и перемещений масс в верхней мантии вблизи поверхности Мохоровичича) до образования частных региональных структур. На основании геофизических данных построены модели астеносферного, мантийного и корового диапиризма и представлено физическое и численное обоснование реальной возможности этого процесса в тектоносфере Земли (рис.12). Диапиризм служит отражением плотностной инверсии, при ко-



Рис.11. Современные грабены, возникшие при растяжении мегабудин РЗ фундамента (хр. Байбичеттоо, Тянь-Шань). Линии — разрывы, ограничивающие бортовые уступы.

торой относительно легкие породы «всплывают» к поверхности земли. В нем зафиксирована реальная объемная подвижность горных масс.

Тем не менее многие тела протыкания не являются диапировыми структурами в прямом смысле этого понятия, так как не связаны напрямую с плотностной инверсией. В частности, много написано о гранитных диапирах. Разновидностей гранитов великое множество. Они очень широко распространены в континентальной земной коре, особенно так называемые «нормальные» граниты, состоящие в примерно равных пропорциях из зерен кварца ($\approx 30\%$), полевого шпата ($\approx 30\%$) и слюд ($\approx 30\%$) с незначительной примесью других минералов, не играющих заметной роли в формировании физических свойств породы. Считается, что подобные гранитные купола образуются в результате внедрения в земную кору расплавленных гранитных масс или по мере их всплывания за счет разницы в плотности гранита и окружающих пород, т.е. в результате плотностной инверсии. Это классическое представление о формировании гранитных массивов. Оно верно в том случае, когда внедрение осуществляется в горячем состоянии и образуется гранитная интрузия или когда происходит общий прогрев недр и возникают термальные гранитно-метаморфические купола. Но нас интересует поведение гранитных тел уже после их остывания и общей консолидации, их движение в холодном состоянии, уже после того как породы подвергнутся размыву и пепеленезации.

Вертикальные протрузии. Всплывание и протыкание вышележащих толщ раскристаллизованными монокристаллическими гранитами за счет разности плотностей представляется маловероятным, так как плотностная инверсия не может привести к эксгмации гранитов и их внедрению «en block» в перекрывающие слои из-за сил трения, возникающих на границе массива и контактирующих с ними пород. Необходимы какие-то дополнительные факторы, обеспечивающие объемную подвижность пород. Такой фактор, прежде всего, — тектоническая переработка, придающая гранитам облик гранулированной среды и, как следствие, — тектоническое течение.

Классический гранит — символ монолитности, прочности и незыблемости — самой природой предрасположен к потере связности и к переходу в типично гранулированное состояние даже при очень незначительных напряжениях. Граниты гранулированы изначально, что отражено и в самом названии породы (от лат. *granum* — «зерно»). Сцепление еще более ослабевает при остывании и термической усадке. Растрескивание, брекчирование начинается на глубине в несколько километров. Граниты превращаются в рассыпчатую (гранулированную) породу — какериты, брекчии, катаклазиты. Они могут быть дезинтегрированы до песка или алевролита. И эта новая по своим физическим свойствам порода под влиянием внешних



Рис.12. Модель структуры протыкания (диапира) в условиях плотностной инверсии и градиента силы тяжести (по Х.Рамбергу).

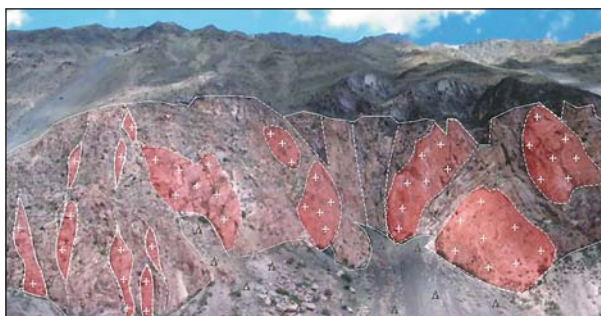


Рис.13. Куполообразная структура (протрузия), образованная раздробленными и катаклазированными гранитами. В массе катаклазитов «плавают» отдельные фрагменты менее раздробленных пород. Тянь-Шань.

тектонических сил и (или) реализации внутренней (латентной — по В.С.Понамареву [7]) энергии начинает перемещаться (течь) в пространстве и изменять свою первоначальную форму (рис.13). Парадокс? Гранит и вдруг течет. Но это так, и здесь проявляется так называемое катакластическое течение, т.е. дифференциальное перемещение частиц (гранул) вещества относительно друг друга — и в то же время совокупное перемещение всей массы гранитов как единого целого. Из-за потери гранитами внутренней связности и превращения в гранулированную среду их вязкость уменьшается. Они формируют сложные структуры, протыкая фундамент и перекрывающий его осадочный чехол, выходят на поверхность и создают горный рельеф. Наиболее приподнятые участки рельефа сложены самыми податливыми к выветриванию породами — раздробленными и катаклазированными, — которые прорывают более молодые отложения. Образуются так называемые геоморфологические аномалии (рис.14, 15). Такие морфоструктуры (тектонические структуры, имеющие морфологическое выражение) отмечены на Тянь-Шане, в Казахстане, Читинской обл., Забайкалье. Они известны в Скалистых горах Северной Америки и других регионах.

Учитывая все эти закономерности, логичнее предположить, что применительно к подобным



Рис.14. Гранитная протрузия, сложенная палеозойскими катаклазированными гранитами (показано красным) и прорывающая мезозойский осадочный чехол (показано зеленым). Несмотря на полную дезинтеграцию пород, граниты образуют наиболее высокие участки рельефа — геоморфологическую аномалию. Гобийский Алтай.

тектоническим структурам главенствующую роль играет механизм вязкостной инверсии. В частности, Е.И.Паталаха писал, что система «деформируемая среда горных пород — включенное в нее менее вязкое тело не является равновесной. В более текучем (менее вязком) теле возникают избыточные напряжения, действие которых направлено на прорыв среды. В результате вязкостной инверсии более текучие тела выжимаются по направлению к областям с меньшим литостатическим давлением, т.е., в конечном итоге, по направлению к поверхности» [8].

Механизм вязкостной инверсии более универсален, чем механизм плотностной инверсии, так как позволяет объяснить внедрение в высокие горизонты земной коры не только легких, но и тяжелых горных масс типа гипербазитов. Такие тела протыкания в геологической литературе называют протрузиями. Этот термин предложил Ч.Лайель в 1871 г. для обозначения первично интрузивных пород, которые затем (уже в твердом состоянии) были выдвинуты (выжаты) в вышележащие слои в результате «многочисленных шоков земной коры» [9].

Возникновение холодных кристаллических протрузий фундамента обусловлено прежде всего неоднородностью вязкостных свойств различных слоев земной коры, т.е. ее тектонической и вещественной расслоенностью. Происходит также и крупномасштабное латеральное перераспределение вещества, отток его из зон повышенной компрессии и нагнетания в зоны геодинамических убежищ. Реальность таких процессов подтверждена многочисленными тектонофизическими экспериментами и расчетными моделями (работы П.М.Бондаренко, А.В.Лукьянова, И.В.Лучицкого, Ю.В.Миллера, Ю.А.Морозова, Х.Рамберга, А.Ф.Ревуженко и др.). Однако систематическое описание структурных механизмов, объясняющих объемное течение холодных кристаллических масс и формирование гранитных протрузий, — в значительной степени достижение лаборатории тектоники консолидированной коры ГИН РАН.

Горизонтальные протрузии и плито-потоки. В последние годы появились данные не только

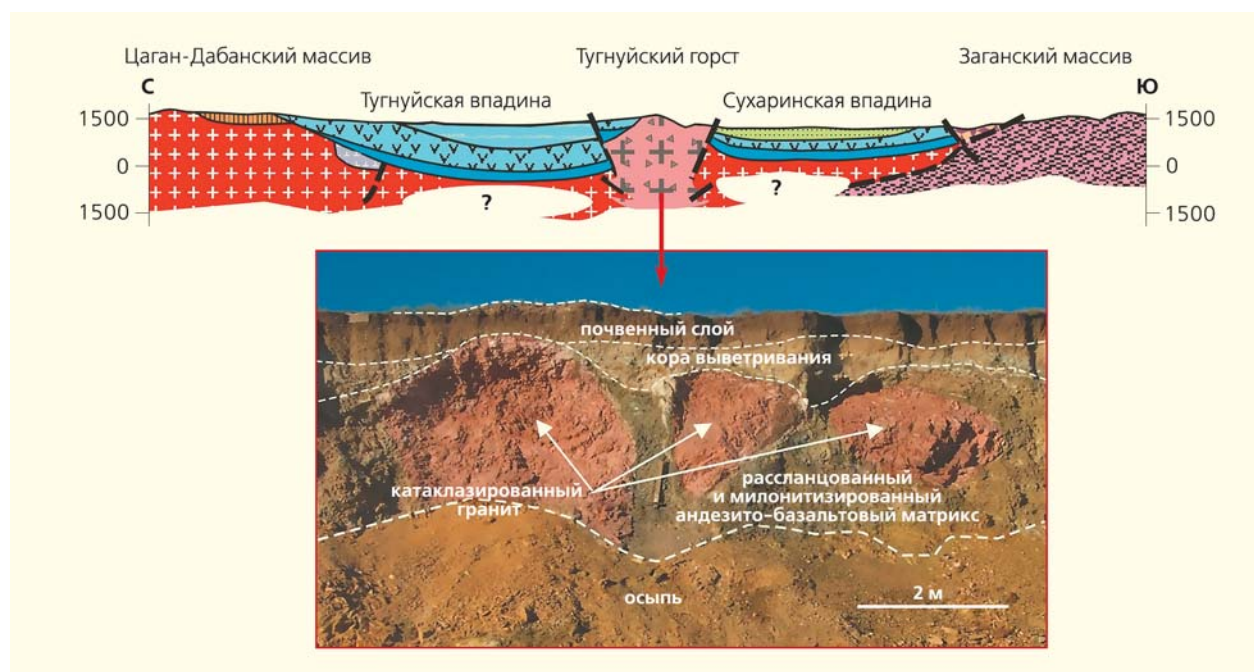


Рис.15. Тугнуйский «горст» — гранитная протрузия, протыкающая молодые платформенные отложения. Западное Забайкалье.

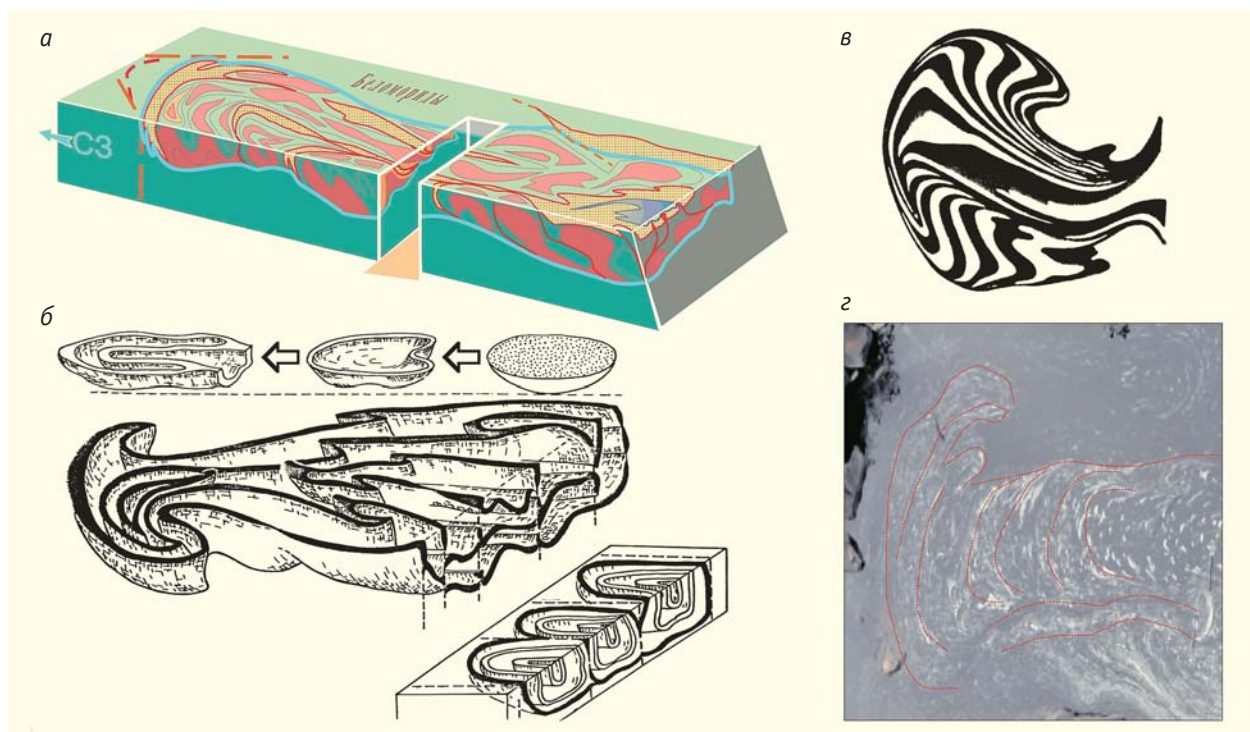


Рис.16. Плито-поток Карельского массива. *а* — структурно-геологическая модель; *б* — схематическая объемная интерпретация строения (в центре); один из механизмов образования структуры «матрешка» (вверху) и структуры «близнецы» (внизу); *в* — модель протрузии, полученная на центрифуге (по: Jackson, Talbot, 1989); *г* — природная модель (медленный водяной поток с пеной).

о вертикальном течении горных масс, но и о латеральных тектонических потоках.

Горизонтальные тектонические потоки, «вмороженные» в структуру коры, отражены в трещинно-разломной тектонике чехольных комплексов (работы М.Л.Коппа), но наши исследования позволили на новом фактическом материале обосновать существование субгоризонтальных потоков и в кристаллическом цоколе структур, формирующихся на континентальной и океанической коре.

Латеральное течение захватывает как ограниченные массы горных пород с образованием небольших горизонтальных протрузий, так и гигантские объемы, формирующие тектонические структуры регионального значения. Таковы, например, латеральные тектонические потоки Анатолии, Карельского массива (рис.16), пояса Лимпопо (рис.17), дуги Скоша и др.

Карельский массив (Балтийский щит) — крупный (500×1000 км) тектонический элемент, фундамент которого сложен архейскими гранитогнейсами и гранит-зеленокаменными породами, а прото-платформенный чехол — нижнепротерозойскими вулканогенно-осадочными отложениями. Структура массива резко отлична от соседних блоков (Беломорского и Свекофеннского) и представляет собой сложно построенные и вложенные друг в друга структурные дуги. Набор структурных ансамблей — зоны нагнетания по фронту, продольные

сдвиговые зоны, области оттока и диффузного сдвига — свидетельствует о перманентном (от раннего протерозоя до наших дней) латеральном объемном течении, которое проявляется на протяжении почти 2 млрд лет. Движение осуществляется на уровне верхне- и нижнекорового слоев. По косвенным данным можно предположить участие в горизонтальном течении и астеносферной мантии. И надо же было случиться, что именно в Карелии, на р.Суне, я увидел природную «действующую модель» процесса объемного течения, которая практически полностью соответствовала реконструкции древнего Карельского плито-потока (рис.16).

Пояс Лимпопо (Южная Африка) представляет собой структуру (130×450 км), разделяющую Зимбабвийский и Каапваальский кратоны (рис.17). Он сложен высокометаморфизованными породами архея, перекрытыми протерозойским прото-платформенным чехлом. Структура массива, характер его ограничений, особенности метаморфизма показывают, что это гигантский плито-поток, внедрившийся между двумя кратонизированными массами. Формирование его структурного плана растянуто более чем на 200 млн лет. Движение осуществляется в пределах всей коры и, по видимому, подкоровой астеносферы.

Горизонтальным плито-потокам свойственны общая корытообразная чешуйчато-покровная структура и подковообразный изгиб структурных

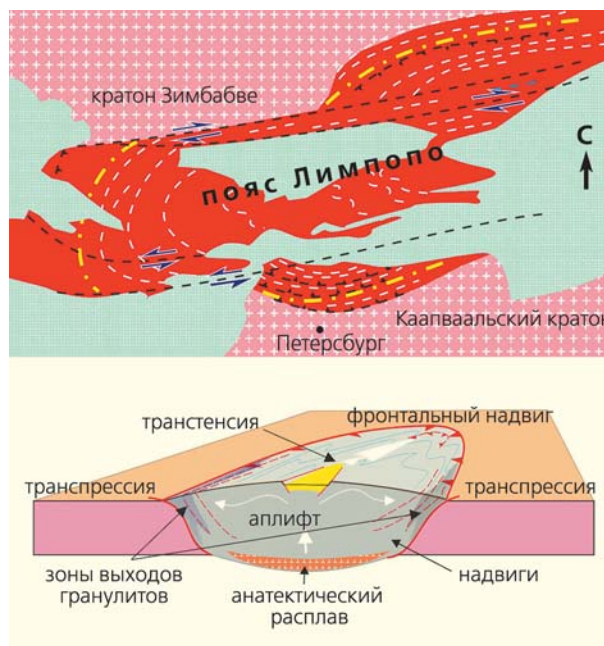
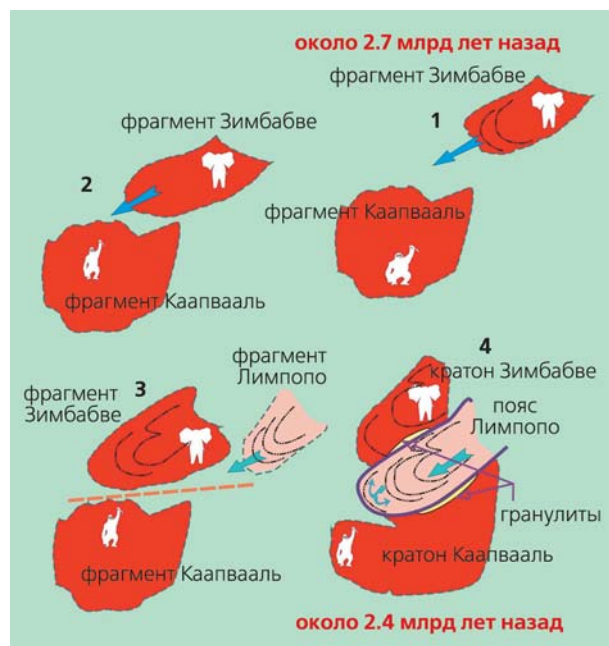


Рис.17. Плито-поток Лимпопо. Слева — основные этапы становления плито-потока (по: Mc Court, Wilson, 1992); справа — элементы строения: структура «матрешки» (по: Van Reenen et al., 1987).



Рис.18. Колчановидная складка в кристаллических породах Карельского массива (внизу) и колчановидная псевдоскладка, сформированная за счет дифференциального перемещения частиц гранулированной среды (вверху).

линий в плане, а также развитые так называемые колчановидные складки (рис.18). Их присутствие особенно показательно, так как они сами по себе отражают объемное течение горных пород. Протрузии же или имеют общую конфигурацию и внутренний рисунок колчановидной складки, или состоят из серии таких складок, образуя структуру «близнецов», тем самым подтверждая течение горных пород и в масштабе всего плито-потока.

Таким образом, можно со всей очевидностью утверждать: горизонтальные протрузии и плито-потоки своим существованием отражают реальную (зафиксированную в структуре земной коры) внутреннюю подвижность огромных объемов горных пород и реальную возможность их латерального перераспределения на разных глубинных уровнях корового слоя континентов.

А зачем все это нужно?

Ну, во-первых, это просто интересно! Знание никогда не бывает лишним, особенно если оно связано с вашим домом, а ведь Земля — наш дом... Разве не любопытно узнать, что земная твердь под ногами вовсе не такая уж и твердь, что она подвижна и даже может течь, как вязкая жидкость? К тому же земная кора континентальных платформ и плит, вопреки распространенному мнению, вовсе не склеротизированная, давно застывшая субстанция, а продолжает жить своей активной и своеобразной внутренней жизнью.

Незаметно для человеческого глаза в глубинах коры и на ее поверхности возникают новые

структуры и формы рельефа, меняются внешний облик и внутреннее содержание самой коры. И если раньше вся современная тектоническая активность сводилась к проявлению вулканизма и сейсмичности, свойственным главным образом подвижным зонам Земли, то теперь становится понятным, что и стабильные участки нашей планеты с, казалось бы, незбылемым гранитным фундаментом на самом деле живые.

Но рассмотренный аспект тектоники земной коры имеет не только чисто академический интерес. Проблема не лишена и практической значимости. Становится, например, понятно, почему на платформах сейсмичность слабее, чем в складчатых поясах. Связано это, вероятно, кроме других причин, с тем, что в складчатых поясах процесс накопления и разрядки напряжений идет очень быстро и концентрируется в определенных узких зонах, а на платформах релаксация напряженного состояния рассредоточена в пространстве по множеству структурных элементов самого разного масштаба и происходит неодновременно. В подвижных поясах земля раскалывается с треском и грохотом, а на платформах — легонько, но непрерывно потрескивает, что прекрасно фиксируется приборами.

Объемная подвижность кристаллических толщ, в том числе и гранитоидов, имеет принципиальное значение для понимания многих вопросов общей геодинамики консолидированной коры, в том числе механизмов эксгумации пород фундамента и их экспонирования на поверхность Земли, а также механизмов формирования внутриплитных седиментационных бассейнов — вместилищ многих полезных ископаемых.

В частности, на основе изучения механизмов объемной подвижности кристаллических пород нами разрабатывается модель формирования залежей углеводородного сырья (нефти и газа) в пределах гранитных протрузий. О том, что нефть содержится в гранитах, известно давно, но существующие модели сводились лишь к «хрупкому» варианту образования гранитных горстов (блоков, куполов). Эти модели не объясняют мно-

гие моменты зарождения и эволюции гранитных ловушек. Механизм формирования протрузивных гранитных массивов за счет объемного течения гранулированных пород открывает новые возможности для поисков залежей углеводородов в гранитно-метаморфическом фундаменте.

Возникает вопрос, а при чем здесь упомянутый в начале статьи Волгоградский мост и его пляски? Дело в том, что феномен пляшущего моста показал реальную возможность объемной упруго-пластической деформации, которая захватывает значительные массы условно монолитной субстанции, и при этом безо всяких видимых структурных изменений. Он дал наглядный пример существования такого эффекта в горных породах. Ведь бетон по своей структуре и составу — та же горная порода. А наши исследования позволяют предположить, что деформация моста, как и в толщах кристаллических пород, могла осуществляться по законам механики гранулированных сред. Так сошлись в единое целое проблемы структурообразования в земной коре и задачи механики твердого тела.

И последнее. В этом очерке был рассмотрен только структурно-тектонический аспект жизни консолидированного слоя земной коры. Однако в недрах древнего фундамента континентов происходят и вещественные трансформации, связанные с механохимическими преобразованиями горных пород и минералов, проявляется процесс вертикальной аккреции (наращивания) гранитно-метаморфического слоя за счет взаимодействия различных оболочек Земли на разделах мантия—кора, нижняя—верхняя кора, фундамент—чехол, литосфера—гидросфера/атмосфера. Рассмотрение этих явлений — предмет отдельного описания, но они также отражают активную внутреннюю жизнь корового слоя, который, казалось бы, давно отправлен природой на заслуженный отдых. Ан нет! И если учесть, что мы наблюдаем активные тектонические процессы в толщах пород возрастом более чем 1.5—2 млрд лет на протяжении всего периода их существования, вплоть до наших дней, то можно сказать: «Земная кора — субстанция вечно живая!». ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проекты 01-05-64281, 04-05-64148 и 10-05-00852.

Литература

1. *Леонов М.Г.* Тектоника консолидированной коры. М., 2008.
2. *Арган Э.* Тектоника Азии. М., 1935.
3. *Ажигрей Г.Д.* Структурная геология. М., 1966.
4. *Кинг Л.* Морфология Земли. М., 1967.
5. *Лукьянов А.В.* Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере. М., 1991.
6. *Бероуш Р.* Фундамент // Структурная геология и тектоника плит. М., 1991. С.265—269.
7. *Пономарев В.С.* Энергонасыщенность геологической среды. М., 2008.
8. *Паталаха Е.И.* О дифференциальной подвижности совместно деформируемых разнородных геологических тел, ее причинах и следствиях. Вязкостная инверсия // Геотектоника. 1971. №4. С.15—20.
9. *Геологический словарь.* Т.2. М., 1973.