

**ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА**

© Г.Г.Кулиев, 2008

**О ВНУТРЕННЕМ СТРОЕНИИ ЗЕМЛИ И ТЕКТОНИКЕ В РАМКАХ НЕКЛАССИЧЕСКОГО ЛИНЕАРИЗИРОВАННОГО ПОДХОДА**

Г.Г.Кулиев

*Институт геологии НАН Азербайджана  
AZ1143, Баку, просп. Г.Джавида, 29А*

Эволюция Земли в пределах неклассически линеаризованного подхода (НЛП) изучается в виде последовательности смены неустойчивых состояний равновесия, проявляющихся в форме возмущений (аномалий) фонового непрерывного развития. Возмущенные состояния характеризуют образование структурных элементов разного масштаба и возникают при определенных критических соотношениях между геометрическими, разнообразными (произвольной природы) силовыми и деформационными параметрами фонового состояния. Структурные элементы внутреннего строения Земли соответствуют фундаментальным характеристикам деформируемой системы; теоретически обосновывается наличие обнаруженных ранее геолого-геофизическими методами вертикальных и следующих из НЛП латеральных структур разломного типа и показывается, что они возникают как необходимые этапы закономерного развития Земли; предлагаются новые механизмы образования этих и аналогичных тектонических структур.

1. Исследования закономерностей эволюции шарообразной Земли, условий возникновения ее основных структурных элементов, механизмов их участия в геодинамике и в формировании современного внутреннего строения до сих пор относятся к числу дискуссионных проблем геологии и геофизики. Несмотря на почти двухсотлетнюю историю изучения, они еще далеки от завершения. Здесь еще много нерешенных принципиально важных вопросов.

С развитием техники и методов сейсмотомографии, аэрокосмического зондирования, GPS технологии и прогрессом в изучении физико-механических, петрофизических свойств минералов и пород при высоких термобарических условиях проблемы данного направления получили мощный импульс для дальнейшего развития. Многие устоявшиеся научные представления значительно были уточнены, претерпели существенные изменения и были дополнены. Был разработан и воспринят специалистами ряд научных концепций и теорий, которые, сыграв свою роль в изучении этих проблем, в дальнейшем были пересмотрены. Их место сейчас занимают другие подходы, и

этот процесс продолжается. Накопленные в большом объеме геолого-геофизические экспериментальные данные легли в основу различных общих теоретических моделей эволюции Земного шара и частных моделей образования и развития отдельных ее структурных элементов. Создание адекватных теоретических моделей в этих направлениях, постановка соответствующих им задач геологии и геофизики, разработка методов их решения, обработка и интерпретация на их основе экспериментальных, полевых и других фактических материалов являются достаточно актуальными фундаментальными и прикладными задачами. Появившиеся в последние годы многие обобщающие монографии, обзорные статьи и оригинальные труды авторитетных ученых, многочисленные специализированные научные журналы по данной тематике также показывают, что научное сообщество прилагает серьезные усилия для решения этих фундаментальных проблем. Известно, например, что программа «Глубинное строение Земли» является одним из основных направлений деятельности институтов Отделения наук о Земле Российской Академии наук.

Проблема внутреннего строения Земли – сверхсложная и многогранная. В исследованиях этой проблемы наметился ряд основных направлений. Отдельно рассматриваются геолого-физические задачи и модели, относящиеся к континентальной и океанической коре (здесь также имеется внутренняя дифференциация, т.е. структуры осадочного чехла и консолидированной коры–фундамента), континентальной и океанической литосфере, верхней, средней и нижней мантии, внешнему и внутреннему ядру. Естественно, что наиболее разработанными являются задачи, относящиеся к осадочному чехлу, т.к. наряду с косвенными геолого-геофизическими методами исследований здесь имеется возможность непосредственного наблюдения с помощью бурения скважин. Поэтому данные результаты наиболее достоверны, а полученные на их основе представления о внутренней структуре осадочного чехла, о динамике его развития и об его роли в развитии коры, литосферы и т.д. используются в качестве базовых при изучении более глубоких структурных элементов Земли. Геофизические методы исследования для более глубоких недр Земли также тестируются и апробируются при изучении осадочного чехла.

Задачи, относящиеся к осадочному чехлу, наряду с научным также имеют практическое значение. Это связано с тем, что, с одной стороны, здесь находятся полезные ископаемые, а с другой стороны, в составе литосферы осадочный чехол участвует в подготовке геологических катастроф, представляющих опасность для человека.

Из многочисленных фактических геолого-геофизических данных следует, что шарообразная Земля состоит из коры, мантии и ядра, которые в свою очередь расслоены различными геосферами (Белов А.А., Гарагаш И.А. и др., Георгобиани, Дмитриевский А.Н., Егоркин А.В., Закарая Д.П., Короновский Н.В., Леонов Ю.Г., Ломизе М.Г., Мейсон Р., Меланхолина Е.Н. и др., Павленкова Г.А., Паталаха Е.И. и др., Пейве А.А., Пушаровский Д.Ю., Пушаровский Ю.М., Руженцев С.В., Соколов С.Д., Сорохтин О.Г., Суворов А.И., Ушаков С.А., Фундаментальные проблемы общей тектоники, Хаин В.Е., Шишкин Е.И., Шишкина Т.Ю., Bhattacharya A.R., Boyer S.,

Elliot D., Coword M.P., Ries F.C., Enderle U. et al., Goleby D.R., Shaw R.D., Hilst R.D., Lister J.R., Buffet B.A., Lobkovskiy L.I. et al., Magnitskiy V.A., Montelli R. et al., Olsen K.H., et al., Reston T.J., Ringvud A.E., Sandwell D., Smith W.H., Singh S.C., McKenzie D., Trempert J. et al., White S.H., Bretan P.G., Williams O., Revenaugh J.). Сейсмическими методами в мантии выделены (Егоркин А.И., Павленкова Н.И., Пушаровский Ю.М., Su W. et al., Williams O. and Revenaugh J.) глобальные границы, ограничивающие указанные геосферы и ряд промежуточных границ в их внутренних частях. Выделенные границы хорошо коррелируются с глобальными сейсмическими рубежами и зонами минеральных и химических преобразований в мантии (Пушаровский Д.Ю., Пушаровский Ю.М., Hilst R.D., Trempert J. et al.). По вскрытым эрозией неактивным зонам коры визуально наблюдаются сдвиговые зоны, покровы и надвиги (Белов А.А. и др.). В работах вышеуказанных авторов и др. установлено, что сейсмотектонические процессы, связанные с подобными зонами, более характерны для активных регионов литосферы. Исследованы механизмы образования и развития глубинных сдвиговых зон в современных и древних тектонически активных поясах мира, их роль в динамике литосферы и предложена концепция тектонической расслоенности литосферы (Белов А.А., Пейве А.В.). Обоснованное огромным фактическим материалом фундаментальное учение о тектонической природе расслоения литосферы (Пейве А.В.) опирается на три основных положения: 1) широкое распространение тектонических покровов (Белов А.А., Руженцев С.В. и Соколов С.Д., Фундаментальные проблемы общей тектоники); 2) способность литосферы к большим пластическим деформациям и тектоническому течению (Лукьянов А.В. и Лукьянова В.Р.); 3) несоответствие (дискордантность) тектонической структуры пластин, находящихся на разной глубине, выявленное аэрокосмическими, геоморфологическими и геофизическими методами (Трифонов В.Г., Трифонов В.Г. и Певнев А.К.). Геофизические данные позволили дополнить эти геологические представления информацией по глубинным структурам, тектоническим, температурным и химико-фазовым процес-

сам, протекающим в настоящее время. В частности, выявлено, что псевдовертикальные у поверхности Земли сдвиговые нарушения вылаживаются с глубины (Георгобиани и Закарая Д.П., Шишкин Е.И. и Шишкина Т.Ю., Feng R. and McEvelly T.V., Goleby D.R. et al., Reston T.J.). По повышенной концентрации гипоцентров землетрясений в некоторых интервалах глубин также выделены механически ослабленные зоны (Калинин В.А. и др.). Прекрасными геолого-геофизическими парадигмами, показывающими роль структур разломного типа в формировании и динамике тектоники верхней мантии, являются существующие в коре, местами в глубоких частях континентальной и океанической верхней мантии аллохтоны, несогласия и надвиги в виде наклонных сейсмических рефлекторов (отражателей). Такие структуры обнаружены на сейсмических профилях, которые охватывают огромные вертикальные разломные зоны, достигающие до глубины 200 км (зона Чарли Гиббса, разделяющая Северную и Центральную Америку (Пушаровский Ю.М.).

Томографические исследования (Пушаровский Ю.М., Cserepes L. et al., Deuss A. and Woodhouse J.X., Dziewonski A.M., Dziewonski A.M. and Woodhouse J.H., Enderle U. et al., Ekstrom G. and Dziewonski A.M., Forte A.M. et al., Forte A.M. and Mitrovica J.X., Fukao Y. et al., Grand S.P. et al., Gu Yu et al., Hilst R.D., Kellog L.H. et al., Kennet B.L.N. M. et al., Kido M. and Yuen D., Loper D.E. and Lay T., Marnyama S., Montagner J.P. and Tanimoo T., Montelli R. et al., Polet J. and Anderson D.L., Resovsky J.S. and Ritzwoller M.H., Ritsema J. and Van Heijst H.J., Shearer and Flanagan M.P., Singh S.C. and McKenzie D., Su W. et al., Trempert J. et al., Van der Hilst R.D. and Korason H., Vasco D.W. and Johnson L.R., Vinnik L. et al., Widiyantoro S. et al., Widiyantoro S. et al., Zhang Y.S. and Tanimoto T.) показывают, что в средней и нижней мантии также существуют неоднородности и границы раздела геосфер. Такие неоднородности, занимающие огромные площади и имеющие толщину в десятки километров, находятся на различных глубинах коры и мантии Земли. Обнаружено, что ниже отметки определенных глубин плотность вещества не увеличивается; наоборот, здесь оно (т.е. вещество) находится

в разуплотненном состоянии. Скорости сейсмических волн на границах этих неоднородностей скачкообразно изменяются. Внутри этих неоднородностей скорости сейсмических волн иногда в несколько раз меньше, чем в верхних и нижележащих зонах. В связи с этим в научной литературе эти неоднородности нередко называют волноводами. Разработаны различные подходы к исследованию причин и механизмов их образования. В частности, в (Алешин А.С. и Галаганов О.Н.) анализ физической сущности выявленных сейсмотомографией неоднородностей в мантии (Montelli R. et al.) показал, что местом зарождения вторичных энергетических очагов плюмов и конвективных ячеек являются зоны субгоризонтальных тектонических срывов.

Считается, что существующая в верхних геосферах расслоенная структура сформировалась главным образом в результате тектонических движений, что доказываются ныне общепризнанными теориями глобальной тектоники плит и тектонической расслоенности литосферы (Белов А.А. и др., Пейве А.В., Пейве А.А. и Пушаровский Ю.М., Пушаровский Ю.М. и Пушаровский Д.Ю., Суворов А.И., Фундаментальные проблемы общей тектоники, Хаин В.Е., Хаин В.Е. и Ломизе М.Г.). На основе анализа трехмерных изображений сейсмотомографических неоднородностей, их пространственного размещения, формы, размеров и интенсивности проявления в мантийных геосферах сделан вывод (Дортман Н.Б., Пушаровский Ю.М.) о том, что тектоносфера не ограничивается литосферой или верхней мантией, как принято думать, а простирается вплоть до земного ядра, охватывая мантию в ее полном объеме. Считается (Пушаровский Ю.М., Хаин В.Е.), что континенты движутся по зонам тектонических срывов на глубинах до 450-500 км. Массы верхней мантии движутся вдоль поверхности Мохо и сейсмического раздела на глубине 670 км (основание верхней мантии). Отмечается, что проскальзывание масс в более глубоких геосферах вполне вероятно. Считая, что на больших глубинах вследствие изменчивости термобарических условий могут существовать зоны частичного плавления, предполагают, что по ним могут происходить тектонические срывы. Принимается, что

глубже 800 км должны преобладать деформации сублатеральных срывов.

На основе экспериментальных исследований породообразующих минералов в условиях огромных статистических и динамических термобарических воздействий выполнен большой цикл работ с целью обоснования результатов данного класса геолого-геофизических задач (Альтшулер Л.В. и др., Дортман Н.Б., Жарков В.Н. и Трубицин В.П., Калинин В.А. и др., Мейсон Р., Пуарье Ж.П., Aleksandrov G.T. et al., Bakulin V.N. and Protoseniya A.G., Bayuk E.I. et al., Kalinin V.A., Kuliev G.G., Navrotsky, Physical properties of the mineral system of the Earth's interior, Tokсюз M.N. et al., Yin H. and Rasolofosaon P.N.J.). Показано (Калинин В.А. и др., Ringvud A.E.), что под (динамическим и статическим) термобарическим воздействием происходят изменения механических и прочностных характеристик веществ при различных структурных фазовых переходах. Экспериментальные исследования (Ringvud A.E.), расчеты диаграмм состояния (Кусков О.Л. и др.) и данные по метоморфизму (Добрецов Н.Л. и Хлестов В.В.) показали, что при высоких термобарических условиях, существующих в коре и мантии Земли, большинство породообразующих минералов подвергаются различного рода микроструктурным превращениям (фазовые переходы, химические реакции). Особенное внимание уделено исследованиям скачков плотности, изменения объемного модуля сжатия и теплоты превращения. В процессе превращения понижается предел прочности и изменяется характер разрушения. Для активизированных зон метаморфизма земной коры и верхних частей мантии характерны твердотельные метаморфические превращения вещества, т.е. процесс, при котором происходят изменения плотности и структуры испытывающих превращения кристаллических зерен и замена старых зерен с большой плотностью нарушений кристаллической решетки на новые – свободные от этих нарушений. В этом процессе происходит падение прочностных характеристик, рост деформируемости и уменьшение (по крайней мере некоторых) упругих модулей претерпевающих превращения веществ (Калинин В.А. и др., Пуарье Ж.П.). Развитие аномалии линейных упругих свойств имеет место только в случае

достаточно быстрой кинетики метаморфического превращения, а возникновение аномалии прочностных свойств слабо лимитируется этим параметром.

Приведенные экспериментальные факты и научные представления положены в основу модельных исследований строения литосферы, т.е. постулируется, что в структуре литосферы существуют механически ослабленные плоские слои, и путем применения вышеупомянутых особенностей физических свойств твердых тел при превращении рассчитываются характерные параметры (ориентация, мощность, амплитуда и скорость смещения). Таким путем удастся дать научное обоснование генезису глубинных сдвиговых зон, выявленных в нижней коре и в верхней мантии (Goleby D.R. et al., Reston T.J.). В (Калинин В.А.) объяснены природа больших относительных перемещений слоев литосферы, образование некоторых геологических структур, механизмы ряда поверхностных и глубокофокусных землетрясений. В (Калинин В.А. и др., Калинин В.А.) отмечается, что слои микроструктурных превращений являются волноводами для сейсмических волн, поскольку такие превращения вызывают ослабление (потерю) механических свойств слоя или отдельной области Земли, где они происходят. Указывается, что в зависимости от скорости изменения термобарических условий и скорости протекания микроструктурного превращения оно одновременно может охватить слой мощностью до нескольких километров. Также выполнена интерпретация сейсмотектонических процессов в активных регионах литосферы на базе аномальных физических свойств горных пород при микроструктурных превращениях. Существует также альтернативный подход, основанный на изменении прочности и характера разрушения геоматериалов с глубиной (Гарагаш И.А. и др., Lobkovskiy L.I. et al., White S.H. and Bretan P.G.) и образовании в средней коре механически ослабленных слоев.

Вышеизложенный обзор результатов геолого-геофизических исследований свидетельствует, что в строении литосферы, средней и нижней мантии существуют механически ослабленные (сдвиговые) зоны. Тектоническими процессами охвачена вся мантия, т.е.

и средней, и нижней мантии также присущи тектонические структуры, течения и движения. Серьезное внимание уделено также изучению закономерностей распределения плотности вещества Земли по глубине, т.к. появление аномальных плотностных изменений по глубине считается одним из основных показателей существования разуплотненных слоев с волноводными свойствами. С другой стороны, без знания характера распределения плотности вещества по глубине невозможно определить другие параметры внутреннего строения Земли.

Аномальные плотностные изменения по глубине Земли связываются с химико-фазовыми переходами. Действительно, если термобарические воздействия достигают определенных величин, минералы подвергаются химико-фазовым переходам и происходит скачкообразное увеличение плотности веществ. Это экспериментально подтвержденный факт. До и после достижения этих определенных значений рост уровня термобарических воздействий приводит к росту плотности веществ. Естественно, возникают вопросы: каков механизм приращения плотности веществ по глубине Земли с учетом разуплотненных зон? Каков механизм образования зон разуплотнения по глубине? Возможно ли объяснить эти механизмы в пределах феноменологических подходов? Частично на первый и последний вопросы для глубин средней и нижней мантии и случая изотропных однородных моделей отвечает известная формула Адамса-Вильямсона (Jarkov V.N.), которая в последующем была обобщена и для случая неоднородности, связанной с температурными полями (Kalinin V.A.). Вместе с этим эта формула никак не проясняет второй вопрос и не учитывает основной фактор, приводящий к изменению плотности веществ, давления (напряжения). Этот главный недостаток присущ и методу определения сейсмического параметра  $\Phi$ , т.к. он определяется с помощью формул классических линейных теорий упругости и волн. Проблема о приращении плотности ниже будет рассмотрена отдельно.

Другим существенным недостатком этих формул является игнорирование физической, геометрической нелинейности и величин (малых и больших) деформирования, т.е.

они применимы лишь в случае малых линейных упругих деформаций. В условиях огромных термобарических воздействий, указанные факторы наряду с напряженным состоянием среды оказывают решающее влияние на физико-механические и плотностные свойства.

Накопленный опыт по применению неклассически линеаризированной теории тектонофизики к проблемам современной геодинамики (Абасов и др., 1999, 2000; Кулиев, 2005а, 2005б) и новая модель развития литосферы (Abasov et al.) показывают, что приемлемые ответы на вышеставленные вопросы, с учетом изложенных недостатков, возможно получить в рамках неклассического линеаризованного подхода.

2. В исследованиях деформационных процессов наряду с классической линеаризацией в малой окрестности начального состояния широкое применение нашла также неклассическая линеаризация в малой окрестности произвольной точки актуального состояния (Biot M.A., Guz A.N.). В рамках этого подхода получается специфическое линейное приближение в нелинейной теории. Специфичность состоит в том, что линеаризация не проводится в малой окрестности конечной точки начального состояния, а производится в малой окрестности произвольной точки актуального состояния. В случае однородных начальных напряженных состояний основные уравнения движения неклассически линеаризованной теории по внешней форме идентичны уравнениям классической теории. Эта идентичность формальна. Во-первых, постоянные коэффициенты, входящие в эти уравнения, формируются линейными и нелинейными физико-механическими свойствами, силовыми, геометрическими параметрами и плотностью среды, которые описывают весь предыдущий процесс деформирования (малые, большие, линейные, нелинейные, упругие, упруго-пластические, упруго-вязкие и др.) и возмущения в малой окрестности рассматриваемой точки. Во-вторых, эти уравнения получаются относительно возмущений. В то же время уравнения классических теорий получаются относительно перемещений начального состояния, входящие в них коэффициенты характеризуют лишь линейные физико-механические свойства среды и плотности. Следо-

вательно, неклассически и классически линеаризованные теории описывают существенно различающиеся процессы. Поскольку первая из них получена путем более последовательной и строгой линеаризации, то при определении параметров внутреннего строения Земли предпочтение должно быть отдано ей. Кроме того, она также является достаточно простой для применения.

В рамках данного подхода предложена концепция неустойчивости в геодинамике, согласно которой все процессы и явления рассматриваются не в традиционной геологической, а как бы в новой геофизической среде. Представляется, что традиционная геологическая среда за геологическое время уже подвержена воздействию различных космогенных, экзогенных (в том числе техногенных) и эндогенных физических полей разнообразной природы и изучаемые процессы и явления происходят на этом фоне, т.е. они рассматриваются в виде возмущения относительно параметров фонового (начального) состояния. Это положение находит отражение в методе линеаризации, в структуре основных уравнений и крайних условиях и в методах решения исследуемых задач (Гузь А.Н., Кулиев Г.Г.). В нашем случае фон состоит из медленно – непрерывной эволюции Земного шара. В задаче распределения плотности веществ ее величина на определенной глубине соответствует фону, а ее приращения – аномалии, т.е. возмущению.

В (Пушаровский Ю.М. и Соколов С.Д.) отмечается, что этапы длительного развития Земного шара прерывались кратковременными периодами (эпохами) тектонических деформаций, структурных перестроек и аккрецией. В эти эпохи система находилась в состоянии, далеком от равновесия, которое можно рассматривать как область бифуркации.

Как нам представляется, впервые в наиболее общей постановке проблемы деформационных процессов в геодинамике независимо от их масштабов и природы возникновения были поставлены и исследованы в пределах концепции неустойчивости в (Абасов М.Т., Джеваншир Р.Д., Кулиев Г.Г.). В рамках модели неустойчивости явления бифуркации имеют место не только в общегеологическом эволюционном, но и в любого масштаба современном геодинамическом развитии. Ли-

неаризированный подход (Гузь А.Н., Кулиев Г.Г.) позволяет в выбранной модели определить точки бифуркации, судить о термодинамической ветви и существовании в малой окрестности точки бифуркации того процесса, который исследуется. В (Пушаровский Ю.М. и Соколов С.Д.) отмечается, что ответить на такие вопросы в пределах классической геологии невозможно без использования достижений междисциплинарных теорий. Один из таких подходов базируется на неклассически линеаризованной теории, которая составляет сущность концепции неустойчивости (Кулиев, 2005а, 2005б). В пределах концепции неустойчивости геодинамические процессы на фоне непрерывной эволюции рассматриваются в виде специфических аномалий. Критерии аномальности возмущений геодинамической эволюции определяются путем выделения аномального возмущения в эволюции комбинаций между тремя группами параметров, характеризующими линейные и нелинейные физико-механические свойства среды, геометрию объекта и силовые воздействия различной природы и характера.

При достижении критического состояния этой комбинации, непрерывная геодинамическая эволюция разветвляется, происходят скачкообразные изменения и предшествующее неравновесное состояние переходит к новому неравновесному состоянию. Причем в зависимости от вещественного состава горных пород, слагающих среду в рассматриваемой зоне, и уровня внешнего воздействия смена неравновесных состояний, сопровождающая геодинамическую эволюцию, может наступить на этапах упругих, упруго-пластических, пластических и т.д. стадий деформирования.

Определение критической комбинации между вышеуказанными группами параметров, независимо от реализующегося этапа деформирования, является сложной нелинейной задачей о точке бифуркации нелинейного геодинамического процесса с ветвлениями. В зависимости от преследуемых целей имеются большие классы проблем и задач, где вместо нелинейных задач можно рассматривать неклассически линеаризованные задачи.

Наряду с необходимостью исследования линейных задач с точки зрения практической целесообразности решение самих нели-

нейных задач также требует предварительно-го рассмотрения соответствующих линейных и линеаризованных задач по следующим причинам. Доказательство существования решений нелинейных задач возмущений основывается на информации о решении задач стационарного состояния (или о состоянии покоя), которое полностью совпадает с классически линейной частью рассматриваемых задач. С другой стороны, доказательство существования решений задач возмущенного состояния полностью совпадает с существованием решений неклассически линеаризованной задачи о собственном значении, минимальное положительное собственное значение которого в определенных случаях соответствует первой точке бифуркации в нелинейной задаче (Кулиев, 2005а). Следовательно, исследование линеаризованных задач имеет фундаментальное значение для решения нелинейных задач с ветвлениями и является практической основой для построения решения нелинейных задач путем последовательных приближений. Кроме того, эти же исследования составляют научную основу теоретического обоснования прямого применения различных численных методов решения к нелинейным задачам.

Для сжимаемых моделей среды основные системы уравнений и краевых условий трехмерной НЛП в лагранжевой системе координат  $x_i$  имеют вид (Гузь А.Н.):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \omega_{ij\alpha\beta} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} \quad i, j, \alpha, \beta = \overline{1,4}. \quad (1)$$

Граничные условия в напряжениях

$$N_i \omega_{ij\alpha\beta} \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} \Big|_{S_i} = P_j. \quad (2)$$

Граничные условия в перемещениях

$$u_j \Big|_{S_2} = f_j. \quad (3)$$

Здесь  $u_j$  - компоненты вектора возмущений,  $P_j$  - компоненты вектора внешних сил, при-

ложенных в возмущенном состоянии, отнесенные к единице площадки начального деформированного состояния;  $\rho$  - плотность материала,  $\omega_{ij\alpha\beta}$  - компоненты тензора четвертого ранга, характеризующие линейные, нелинейные физико-механические, реологические свойства среды и начального напряженно-деформированного состояния, которые отличаются для различных упругих потенциалов и для теорий малых и больших деформаций;  $S_1$  и  $S_2$  - участки поверхности рассматриваемого тела;  $f_j$  - заданное значение возмущений  $u_j$ ;  $N_i$  - составляющие орта внешней нормали. В случае статических задач в правой части уравнения (1) инерционный член опускается. Аналогичные уравнения записываются и в случае несжимаемых сред с дополнительными условиями несжимаемости.

В (1)-(3) при отсутствии начальных напряжений, формально принимая, что  $u_\alpha$  являются перемещениями основного состояния, переходим к основным уравнениям и граничным условиям соответствующих классических линейных теорий.

Вышеприведенные формулы являются основными в НЛП и применимы в общем случае, т.е. как для однородных, так и для неоднородных начальных деформаций на любом этапе упругого, упруго-пластического, упруго-вязкого и т.д. деформирования. Такая формулировка остается в силе также для несжимаемых моделей среды. В последнем случае к формулировке задач добавляется условие несжимаемости среды и вносятся соответствующие изменения в структуре  $\omega_{ij\alpha\beta}$ .

В отличие от классического подхода здесь решения уравнений наряду с линейными физико-механическими свойствами строятся в зависимости также от величин и характера нелинейных физико-механических свойств, геометрических и силовых параметров. Такое теоретическое расширение представляет дополнительные возможности для создания более адекватных теоретических моделей и обоснованной интерпретации построенных решений. С другой стороны, такой подход позволяет учесть также влияние

блочности (дискретности) деформируемой структуры на изучаемые явления. Этот вопрос актуален в связи с формированием научного представления о геологической среде как дискретном деформируемом твердом теле, состоящем из блоков. Наличие блоков учитываются при решении более простых задач для основного состояния. Эти решения в виде уже известных коэффициентов будут входить в основные уравнения для возмущений, и, следовательно, возмущенные состояния будут определяться в зависимости от блочности структур.

3. Качественный анализ системы уравнений (1) показывает (Гузъ А.Н., Кулиев Г.Г.), что она имеет три взаимно перпендикулярных семейства характеристических поверхностей. В сферической системе координат они соответствуют меридиональным, экваториальным и сферически концентрическим семействам поверхностей. При осесимметричном деформировании характеристическими являются также соосные цилиндрические поверхности. В двумерном случае в полярной координатной системе имеются два семейства характеристических линий: радиальных лучей и концентрических окружностей. На этих характеристических линиях и поверхностях основные системы уравнений при определенных соотношениях между физико-механическими и силовыми параметрами вырождаются (Кулиев, 2005а). Оказывается, что при этом на этих линиях и поверхностях деформации терпят разрыв. Наглядным примером, экспериментально подтверждающим этот теоретический вывод НЛП, является хорошо известная картина разрушения лобовых стекол автомобилей при попадании в них камней. Исходя из этих фундаментальных теоретических результатов, в (Абасов М.Т., Джеваншир Р.Д., Кулиев Г.Г.) предложено, что при определенных условиях на определенных этапах эволюционного развития Земли существуют возможности образования разломов на трех перпендикулярных семействах поверхностей. Этот результат подводит теоретическую базу под хорошо известные фактические данные геологии и геофизики. Среди основных структурных элементов в геологии важное место занимают вертикальные глубинные разломы. Эти системы разломов выходят на дневную

поверхность Земли и в принципе расположены перпендикулярно друг другу на экваториальных и меридиональных плоскостях. Наблюдаемые отклонения от вертикальности и перпендикулярности связаны с тем, что в отличие от теоретических случаев здесь речь идет о реальных разломах, существующих в структуре сложно-композиционной среды Земли. В (Кулиев, 2005а) сделано предположение о том, что на горизонтальных поверхностях на различных глубинах Земли могут возникать латеральные разломы, соответствующие сферически концентрическим характеристическим поверхностям. Данное теоретическое предсказание созвучно выше рассмотренным геолого-геофизическим фактическим данным о сдвиговых, покровных, надвиговых, волноводных (разуплотненных) и неоднородных структурах, имеющихся в различных геосферах по глубине Земли. Из теоретических результатов следует, что в эволюции Земли, если создаются определенные условия, обязательно должны возникнуть как вертикальные, так и латеральные разломы. Причем в теоретической модели возможность возникновения всех видов поверхностей разрыва равновероятна. В реальном же случае все зависит от множества естественных факторов и действительность иная, т.е. несмотря на то что возникновения разломов на определенных этапах эволюции обязательны, одновременность их появления в силу структурной, плотностной, физико-механической и силовой неоднородности нарушена. Таким образом, в (Кулиев, 2005а) сделан вывод о том, что на различных глубинах Земли должны существовать латеральные разломы, занимающие огромные площади. Естественно, можно предполагать, что некоторые сдвиговые, покровные, надвиговые, разуплотненные зоны и крупные мантийные неоднородности являются латеральными разломами с волноводными свойствами. По крайней мере, разломы либо способствовали образованию таких структур, либо они образовались в результате вышеизложенных процессов. В геомеханическом смысле вертикальные и горизонтальные поверхности разрыва деформаций (которые в результате дальнейшего развития превращаются в огромные разрушенные зоны) друг от друга отличаются лишь в геомет-



рическом отношении. В геологии же вертикальные и латеральные разломы, кроме геометрических параметров, также будут отличаться по генетическим, морфологическим, литологическим, хронологическим и другим геолого-геофизическим параметрам. В качестве основного механизма образования вертикальных разломов считается разрушение среды при растяжении. В то же время основным механизмом образования латеральных структур разломного типа является разрушение среды при сжатии. В связи с этим роли вертикальных разломов и различных латеральных структур типа разуплотненных, сдвиговых, покровных, надвиговых, волноводных и неоднородных зон в динамике эволюции Земли, в различных эндогенных и экзогенных процессах структурообразования значительно отличаются. По-видимому, учитывая эти различия, ученые до сих пор не присвоили название латеральным разломам некоторых ослабленных и разуплотненных зон в недрах Земли, в противовес вертикальным, хотя по основным критериям (глубинности, протяженности и длительности) они почти идентичны.

В геологических исследованиях одним из основных механизмов реализации процессов разрушения в мантии, которые впоследствии превращаются в сквозьмантийные каналы и сублатеральные зоны срыва, считаются дифференцированные тектонические перемещения мантийных масс под действием энергетических градиентов (Пушаровский Ю.М.). Предполагается, что конвективные потоки путем механического захвата отдельных блоков мантии разрушают ее слоистую структуру, в результате чего образуются сквозьмантийные плюмы. Тектоническое течение и движение объемов мантии в особо плотных и жестких средах по субгоризонтальным поверхностям приводят к образованию зон срыва.

На наш взгляд, существуют и другие механизмы образования структур разломного типа, непосредственно не связанные с предположением о движении мантийных масс и горных пород в верхних частях Земного шара. Природа напряжений в геомеханической модели принципиальной роли не играет, она будет влиять только на соответствующие механизмы образования разломных структур. В (Кулиев Г.Г. и др.), основываясь на резуль-

татах исследования механизма разрушения слоистых композитных материалов (Гузь А.Н.), предложено, что одним из возможных механизмов образования латеральных разломов в недрах Земли могут быть разрушения с расслаиванием (размочаливания) при различных напряженных состояниях. В результате расслаивания образуются новые поверхности и пустоты между ними. Дальнейший рост величин напряжений (который может быть обусловлен различными эндогенными, в том числе тектоническими и космогенными процессами) приводит к хрупкой, пластической и т.д. приповерхностной неустойчивости и разрушению (Кулиев, 2005а). Вследствие смены состояний равновесия (возможность которой возникает с появлением новых поверхностей расслаивания) происходят процессы обрушения и обвала приповерхностных слоев слоистой среды раньше, чем напряжения достигают предела прочности. При этом образованные в результате расслаивания пустоты заполняются разуплотненной средой. С другой стороны, неустойчивость может быть причиной реидной деформации по образованной разломной зоне. Такой механизм – один из возможных. Могут быть и другие механизмы. Например, путем нагнетания более пластичные и подвижные вещества могут быть мигрированы в эти пустоты. Можно предположить, что именно латеральные разломы создают возможность существования реидных деформаций и перемещений огромных масс по горизонтали.

Как было отмечено выше, в случае осесимметричного деформирования при достижении критического напряженно-деформированного состояния разрушение происходит по цилиндрической поверхности. При дальнейшем развитии могут происходить потери устойчивости состояния равновесия цилиндрической части по общей, а приразломной зоны – по поверхностной форме. В результате цилиндрическая разломная зона заполняется более разуплотненной средой. В такой обстановке создается предпосылка для превращения некоторых таких зон в сквозьмантийные каналы плюмов, а в верхних геосферах – в диапиры, в субвертикальные разуплотненные тела и в каналы вулканов и т. д.

В тех глубинах, где температура близка к температуре плавления, более разуплотненная (разрыхленная) среда, расплавляясь, превращается в разжиженную массу. Дальнейшая дифференциация напряженного состояния способствует движению этой разжиженной среды, и таким образом происходит массопоток, т.е. тектоническое течение. Вследствие возникновения разжиженной массы, в рассматриваемой зоне повышается устойчивость состояния равновесия, т.к. в деформируемой системе появляются неконсервативные поверхностные воздействия. Разжиженные среды, аналогично жидким, принимают и передают внешние силы как неконсервативные (при быстрых изменениях формы границы силы успевают сохранить свои величины и направления действия). Следовательно, образованные структуры разломного типа и массопоток по ним существуют длительно.

Сделанные в рамках неклассического линеаризованного подхода заключения о возможности образования структур разломного типа, о механизмах их образования и заполнения пустот более разуплотненными средами напрямую связаны с главенствующей ролью дифференциации напряженного состояния. В геологическом же смысле речь идет о роли тектоники, т.е. эти результаты в случае рассмотрения мантии созвучны с предложением (Пушаровский Ю.М., Дортман Н.Б.) о том, что тектонические явления играют важную роль также в средних и нижних мантийных процессах.

В геологии и геофизике структуры разломного типа (спреддинговые зоны, рифты, трансформные, демаркационные, магистральные, косые разломы, зоны субдукции, коллизии, листирические разломы, шовные зоны, сутуры и т.д.) являются одним из основных объектов исследования. Вопросы, связанные с образованием и развитием структур разломного типа, их роли в геодинамике, тектонике и вообще в развитии литосферы и в эволюции Земного шара, в вышеперечисленных и др. работах учеными рассмотрены с различных точек зрения. Число публикаций по данной тематике огромно. Здесь упомянуты ссылки лишь на обобщающие работы последних лет, идеи и результаты которых в той или иной степени созвучны вышеизложенным резуль-

татам НЛП и в определенном смысле являются фактическими подтверждениями ее отдельных выводов. Не останавливаясь на обсуждении результатов этих работ, вдобавок к изложенному во введении обзора, ниже приводим несколько доводов, подкрепляющих наше представление.

В серии работ (Пушаровский Ю.М. и Пушаровский Д.Ю.), при анализе результатов сейсмотомографических исследований, сделан вывод о том, что Земной шар состоит из различных геосфер. Отмечается, что главной особенностью внутригеосферных геодинамических обстановок является их неустойчивость, вызывающая тектонические подвижки, что выражается субгоризонтальными тектоническими срывами. Указывается, что мантийные сейсмонеоднородности как по размерам, так и по форме весьма изменчивы. Они могут достигать многих тысяч километров в линейных размерах. Объемная конфигурация сейсмонеоднородностей и их взаимосвязь в пространстве указывают на материальное движение масс по субгоризонтальным зонам срыва в особо плотных и жестких средах.

На основе фактических сейсмических материалов, относящихся к территориям России и Западной Европы, считается (Enderle U. et al.), что граница Мохо должна рассматриваться как зона тонкого переслаивания пород с мантийными и коровыми свойствами, и что эта зона является, вероятно, зоной дифференциального перемещения коры относительно мантии глобального масштаба. Предполагают, что такие срывы наиболее вероятны в обстановке коллизионных орогенов, континентальных рифов и трансформных разломов типа Сан-Андреаса. Корни этой проблемы восходят к тектонико-кинематической идее (Пейве А.А. и Пушаровский Ю.М., Пушаровский Ю.М.) о «проворачивании» мантийных оболочек относительно друг друга.

Показано (Павленкова Н.И.), что земной коре присуща блоковая делимость, которая на континентах достигает глубин 100 км.

Установлено (Николаев А.В. и Санина И.А.), что в верхней мантии Гиндукуша и Памира сложное сочетание высокоскоростных и низкоскоростных объемов пород напоминает расслоенную коровую часть разреза.

В (Feng R. and McEvilly T.V.) сделан вывод о том, что разлом Сан-Андреаса на глубине 15-20 км, выполаживаясь, превращается в субгоризонтальную поверхность срыва.

В (Resovsky J.S. and Ritzwoller M.H.) показано, что мантия состоит из множества геосфер и средняя мантия обладает большой пестротой в сейсмоструктуре. Причиной этого считаются встречные движения восходящих мантийных масс из нижних геосфер и нисходящих из верхних.

Существуют пассивные и активные модели рифтогенеза (Леонов Ю.Г., Olsen K.H., et al.). Согласно активной модели, рифты образуются путем поднятия мантийного вещества, утонения коры, возникновения растягивающихся усилий и раскола коры. В пассивной модели считается, что коровые напряжения вызывают трещины, которые, развиваясь, образуют рифты и при этом формируются остенолиты. Остенолиты поднимаются в результате декомпрессии, возникающей при расколе литосферы.

Проблемы внутренней объемной подвижности фундамента и ее роли в структурно-тектонической и структурно-вещественной эволюции земной коры и различных геоструктур (Леонов М.Г.), механизмы адвективного течения (Гончаров М.А.), процессы тектонического течения и роль пластической деформации, как одного из ведущих структурообразующих процессов (Лукьянов А.В.), экспериментальное и фактурное обоснование тектонических потоков (Миллер Ю.В., Jaeger H.M. and Nagel S.R.) на основе экспериментальных и теоретических исследований создания представления о тектонических потоках и их реальное значение в формировании структуры земной коры (Паталаха А.И. и др.) так или иначе основаны на предположении о существовании различных разуплотненных, подверженных к существенно большему деформациям сдвиговых зон.

Доказано (Леонов М.Г.), что существуют различные механизмы, обеспечивающие реидное поведение горных масс. Считается, что основными из них являются пластическая, хрупкая, макросколовая (блоковая) и микросколовая (кливажная) деформации, меланжирование, дезинтеграция и катаклаз, динамиче-

ская рекристаллизация и течение гранулированных сред (Jaeger H.M. and Nagel S.R.). Показателем подвижности пород служат пликативные изгибы верхней поверхности фундамента, глубинные диапиры, кристаллические протрузии и признаки тектонической расслоенности верхне- и нижне-корового слоев и т.д.

Существования субвертикальных деструктивных зон и геологических тел в верхних частях коры в Западно-Сибирском бассейне и в Южно-Каспийской впадине соответственно рассмотрены в (Бембель Р.М. и др., Мамедов П.З. и Гулиев И.С.).

К настоящему времени предложен целый ряд сейсмотомографических моделей мантии Земли. Установлена общая дисгармония строения мантии и существование наряду с концентрическими геосферами Земли также и радиальных элементов глубинной структуры: сквозьмантийных суперплюмов легкого горячего материала – апвеллингов и компенсирующих их даувеллингов плотных и холодных масс (Меланхолина Е.Н. и др.). Считается, что в ряде зон верхней мантии существенный вклад в изменение скоростных характеристик вносится также за счет разуплотнения или же уплотнения и создания напряженного состояния среды в ходе деформаций.

Считается, что по причине реологической расслоенности земной коры происходит ее листрическое раскалывание (Георгобиани и Закарая Д.П., Паталаха Е.И. и др., Хаин В.Е. и Ломизе М.Г., Шишкин Е.И. и Шишкина Т.Ю.). Принято, что при пересечении сверху вниз областей хрупко-пластического и пластического разрывообразования глубинные разломы постепенно меняют углы падения своих плоскостей от крутых до пологих, вследствие чего они приобретают листрическую морфологию.

Разделительные зоны между различными геосферами, с одной стороны, играют барьерную роль при взаимодействии геодинамических режимов смежных геосфер, с другой стороны, они способствуют существенным изменениям структурно-тектонических процессов из-за влияния соседних геосфер (Хаин В.Е., Anderson D.L., Hamilton W., Kumazowa M. and Marnyama S.).

Современные движения земной коры по GPS-измерениям изучены (Алешин А.С. и Галаганов О.Н., Гордеев Е.И. и др., Левин В.Е. и др., Трифонов В.Г., Трифонов В.Г. и Певнев А.К., Шевченко В.И. и др., Barka A. and Reilinger R., Beutler et al., Calais E. and Amarjargal, DeMets С.Н. et al., Gent G. et al., Oral M.B. et al., Reilinger R.E. et al., Rothacher M. et al., Takahashi H. et al.) и их результаты свидетельствуют об относительном движении жестких плит. Характер распределения вектора скорости движения на границах континентов и океанов, в континентальных частях плит и в обширных областях взаимодействия плит существенно отличаются. Повышенная способность пограничных поясов к тектонической деформации проявляется в зонах крупнейших активных разломов, таких как Северо-Анатолийской на границе Евразийской и Анатолийской плит, Восточно-Анатолийской между последней и Аравийской плитой, системы Сан-Андреас между Тихоокеанской и Северо-Американской плитами и т.д. (Трифонов В.Г. и Певнев А.К.). Результаты GPS-измерений используются при изучении задач тектоники (Алешин А.С. и Галаганов О.Н., Гордеев Е.И. и др., Левин В.Е. и др., Шевченко В.И. и др., Barka A. and Reilinger R.), характера межплитовых сцеплений и реологических эффектов в мантии (Гордеев Е.И. и др.), для идентификации среднесрочных деформационных предвестников землетрясений, основанных на сопоставлении закономерностей распределения перемещений во времени и после землетрясений по разломам и по механизмам очага землетрясений (Гордеев Е.И. и др., Левин В.Е. и др., Reilinger R. et al.), мониторинге строительных работ (Алешин А.С. и Галаганов О.Н.) и т.д.

Существуют теоретические модели (NUVEL-1, NNR-NUVEL-1, NUVEL-1A, NNR-NUVEL-1A) интерактивного расчета кинематических параметров (скорости и направления движения одной плиты относительно другой) движения литосферных плит по структурам разломного типа (DeMets С.Н. et al.).

Здесь уместно также остановиться на тезисе об относительной нелинейности, открытости саморазвивающейся диссипативной

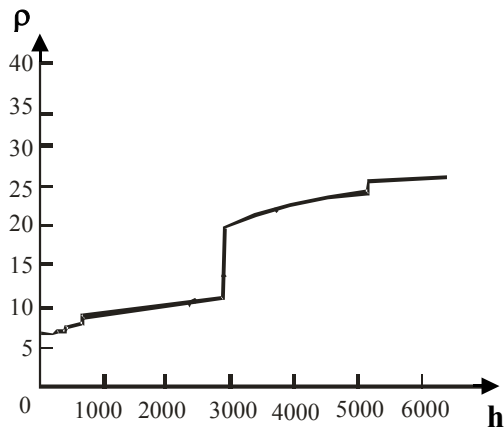
системы Земли, сформулированном в различных работах (Пушаровский Ю.М. и Соколов С.Д., Фундаментальные проблемы общей тектоники, Abasov M.T. et al., Кулиев Г.Г., 2005a). Распространяя эти идеи на все геосферы и на все процессы локальных структурообразований, необходимо рассматривать их также как открытые нелинейные и диссипативные системы. При этом проблемы автономного развития литосферы, мантии и т.д. и первичности их влияния, которые обсуждаются в различных работах (Хаин В.Е., Anderson D.L., Hamilton W.), становятся беспредметными. В силу открытости этих систем процессы, происходящие в них, обязательно в той или иной степени интенсивности и масштаба взаимодействуют друг с другом. Например, вследствие образования в литосфере структур разломного типа происходят изменения в граничных условиях конвективных зон, что непременно видоизменит конвективный процесс. До этого конвективный процесс в рассматриваемом месте участвовал в образовании разлома (например, в спрединговых или в плюмовых зонах и т.д.). Естественно, что процессы, происходящие в литосфере и в верхней мантии, в большой степени взаимодействуют друг с другом. Аналогичное утверждение будет справедливо для процессов в верхней и средней мантии и т.д. Процессы, происходящие в литосфере и в средней мантии, взаимодействуют посредством процессов в верхней мантии, которые независимо от их величины, масштаба и длительности являются необходимыми. Так происходит и во всех других сферах. В связи с этим нет необходимости искусственно повышать значение экзогенности (в том числе космогенности) либо эндогенности причин происходящих в эволюции Земли процессов. Главное – то, что они взаимодействуют.

Аналогичный вывод следует также из концепции вечного круговорота материи и из общих физических принципов геодинамической эволюции Земли (Кулиев, 2002).

4. В рамках общей нелинейной теории механики деформируемых твердых сред получено (Кулиев и Аскеров, 2007) точное решение задачи о приращении плотности сред с ростом деформации. НЛП позволило существ-

венно уточнить характер распределения плотности веществ по глубине и выяснить механизм этого процесса (рис.1). При соответствующем моделировании формы гармонических волн, т.е. в случае использования «истинных» скоростей, в рамках всех вариантов теории начальных деформаций предсказано новое явление: с ростом деформаций с глубиной Земли для отдельных типов геологических сред может возникнуть переход процесса уплотнения в процесс разуплотнения.

Такой теоретический результат в рамках феноменологического подхода позволяет внести существенно новое дополнение к фундаментальному классическому представлению о распределении плотности веществ Земли по глубине (рис.2). По неклассическому представлению приращение плотности с глубиной прекращается процессом разуплотнения, дальнейшее приращение плотности начинается с этого состояния.



а)

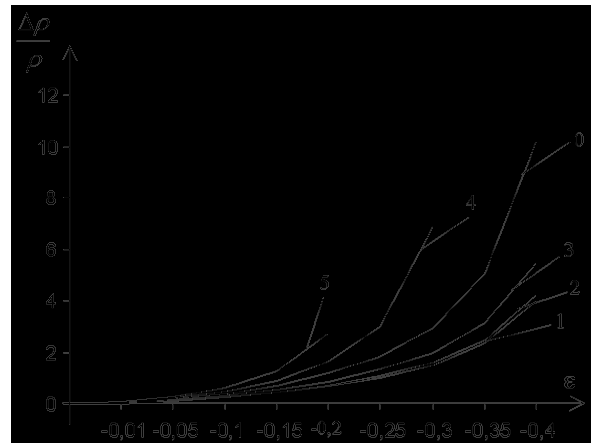


Рис. 1. Графики приращения плотности в случае трехмерного неравномерного деформирования: линия 0 –  $\alpha = \beta = \gamma = 1$ ; линия 1 –  $\alpha = \beta = 1, \gamma = 0,01$ ; линия 2 –  $\alpha = \beta = 1, \gamma = 0,1$ ; линия 3 –  $\alpha = \beta = 1, \gamma = 0,5$ ; линия 4 –  $\alpha = \beta = 1, \gamma = 1,5$ ; линия 5 –  $\alpha = \beta = 1, \gamma = 2$ ;  $\varepsilon_1 = \alpha\varepsilon, \varepsilon_2 = \beta\varepsilon, \varepsilon_3 = \gamma\varepsilon$

Рис. 2. Схема распределения плотности вещества Земли по глубине: а) классическое представление; б) неклассическое представление

Анализ полученных теоретических результатов показывает, что пространственная дифференциация напряжений и нелинейность процесса деформирования играют решающую роль, как в формировании структурных элементов, так и в протекании тектонических процессов.

### Выводы

На основе анализа результатов качественной теории систем дифференциальных

уравнений НЛП и большого объема известных и опубликованных геолого-геофизических материалов сделан вывод о том, что в процессе эволюции Земли на меридиональных, экваториальных и концентрически сферических поверхностях должны появиться как вертикальные, так и латеральные структуры разломного типа, соответствующие фундаментальным характеристикам модели деформируемой системы. Показано, что одним из механизмов образования латеральных разло-

мов может быть разрушение с расслаиванием искривленной структуры слоистой геосреды (layered medium), а образующиеся при этом пустоты могут заполняться разрушенной средой вследствие поверхностной неустойчивости приразломных зон. На определенных глубинах существующий температурный режим может быть достаточным для расплавления этой разрушенной (разуплотненной) среды, т.е. разжижения. Поскольку образованная таким образом разжиженная масса принимает и передает внешнее воздействие как неконсервативная система, то она сможет геологическое время препятствовать заживанию образованных разломов. С другой стороны, в результате последующих неустойчивостей состояния равновесия эта разжиженная масса приобретает движение и по вертикальным и латеральным разломам происходит разномасштабный массопаток, что за геологическое время может являться альтернативным источником тектонических движений как в литосфере, так и в мантии.

При определенных критических комбинациях между силами воздействий различной природы (независимо от того, являются ли они внутренними или внешними), геометрических и деформационных (которые также имеют разнообразную физико-механическую, реологическую, термодинамическую, химическую и т.д. природу) параметров, такие глобальные, региональные и локальные структу-

ры на меридиональных, экваториальных и сферически концентрических поверхностях должны образовываться в коре, литосфере, средней и нижней мантии (т.е. в слоистой оболочке, ограничивающейся атмосферой и жидким внешним ядром Земли).

Возможность таких процессов доказана также точным решением нелинейной задачи о приращении плотности вещества Земли с ростом деформации. Установлено, что для ряда горных пород это решение неустойчиво, т.е. существует возможность перехода процесса уплотнения веществ Земли в процесс разуплотнения с ростом глубины.

#### ЛИТЕРАТУРА

- АБАСОВ, М.Т., КУЛИЕВ, Г.Г., ДЖЕВАНШИР, Р.Д. 1999. Неклассическая теоретическая модель структурного развития литосферы. *Известия НАНА. Науки о Земле*, 2, 149 – 162.
- АБАСОВ, М.Т., КУЛИЕВ, Г.Г., ДЖЕВАНШИР, Р.Д. 2000. Модель развития литосферы. *Вестник Российской Академии Наук*, 70, 2, 129 – 135.
- КУЛИЕВ, Г.Г. 2002. Вечный круговорот материи. Элм. Баку.
- КУЛИЕВ, Г.Г. 2005а. Основы неклассической линеаризованной теории деформаций в геодинамике. *Известия НАНА. Науки о Земле*, 1, 21 – 34.
- КУЛИЕВ, Г.Г. 2005б. Неклассическая линеаризованная теория деформаций в геофизике. *Известия НАНА. Науки о Земле*, 2, 41 – 51.
- КУЛИЕВ, Г.Г., АСКЕРОВ, А.Д. 2007. *Известия НАНА, Науки о Земле*, 1, 38 – 50.