

НОВАЯ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ О ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ЗЕМЛИ

Г.Г. Кулиев

*Институт Геологии НАН Азербайджана
AZ1143, Баку, просп. Г.Джавида, 29А
hatam@lan.ab.az*

Эволюция Земли в пределах неклассически-линеаризированного 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; наличие обнаруженных ранее геолого-геофизическими методами вертикальных и следующих из НЛП латеральных структур разломного типа теоретически обосновывается и показывается, что они возникают как необходимые этапы закономерного развития Земли. Предлагаются новые механизмы образования этих и аналогичных тектонических структур. Большое внимание уделено методологическим аспектам теоретических исследований деформационных процессов в тектонофизике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тектоника, деформация, неустойчивость, разлом, плотность

Введение и краткий обзор.

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 дальнейшего развития. Многие устоявшие научные представления значительно уточнены, претерпели существенные изменения и дополнения. Были разработаны и восприняты 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 др. 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 имеется также внутренняя дифференциация, т.е. структуры осадочного чехла и консолидированной коры–фундамента), континентальной и океанической литосфере, верхней, средней и нижней мантии, внешнего и внутреннего ядра. 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 их развития и об их роли в развитии коры, литосферы и т.д. используются при изучении более глубоких структурных элементов Земли в качестве базовых. Геофизические методы исследования для более глубоких недр Земли также тестируются и апробируются при изучении осадочного чехла.

Задачи, относящиеся к осадочному чехлу, наряду с научным значением также имеют практическую важность. 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 [9,11,15,23,30,36,55,58,61,64,70,71,74,76,80,84, 87,97,101,102,107,110,114, 133,138,139,143,146,148,149,152-159,161,164,166,173,174-177,179]. Сейсмическими методами в мантии выделены [77,87,110,143,156] 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 [36,80,155,156]. По вскрытым эрозией неактивным зонам коры визуально наблюдаются сдвиговые зоны, покровы и надвиги [97]. Установлено, что сейсмотектонические процессы, связанные с подобными зонами, более характерны для активных регионов литосферы [9,11,15,24,30,55,56,70,79,84,97,98,101,112,113,115,138,141,143, 144,148,161,168,169,173,180], средней и нижней мантии [16,19,20,22,25-27,32,36,41,61,69,77,80,87,97,109,110,143,149,154-156,164,173,176]. 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 [97,148]. Обоснованное огромным фактическим материалом фундаментальное учение о тектонической природе расслоения литосферы [148] опирается на три основных положения: 1) широкое распространение тектонических покровов [97,161,173]; 2) способность литосферы к большим пластическим деформациям и тектоническому течению [98,135,136]; 3) несоответствие (дискордантность) тектонической структуры пластин, находящихся на разной глубине, выявленное аэрокосмическими, геоморфологическими и геофизическими методами [168,170,171]. Геофизические данные позволили дополнить эти геологические представления информацией по глубинным структурам, тектоническим, температурным и химико-фазовым процессам, протекающим в настоящее время. В частности, выявлено, что псевдовертикальные у поверхности Земли сдвиговые нарушения выполаживаются с глубины [24,30,70,102,103,142,179]. По повышенной концентрации гипоцентров землетрясений в некоторых интервалах глубин также выделены механически ослабленные зоны [13,40,113]. Прекрасными геолого-геофизическими парадигмами, показывающими роль структур разломного типа в формировании и динамике тектоники верхней мантии, являются существующие в коре местами аллохтонов, несогласий и надвигов в глубоких частях континентальной и океанической верхней мантии в виде наклонных сейсмических рефлекторов (отражателей). Такие структуры обнаружены на сейсмических профилях, которые охватывают огромных вертикальных разломных зон, доходящих до глубины 200 км (зоны Чарли Гиббса, разделяющая Северную и Центральную Америку [156]).

Томографические исследования [16,19-23,25,26,28,31,36,41-43,57,59-61,67,69,72,75-77,80-83,85,86,89,162] 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 [92] анализ физической сущности выявленных сейсмотомографией неоднородностей в мантии [61] 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 доказывается ныне общепризнанными теориями глобальной тектоники плит и тектонической расслоенности литосферы [97,148,149,157,166,172-175,177]. На основе анализа трехмерных изображений сейсмотомографических неоднородностей, их пространственного размещения, формы, размеров и интенсивности проявления в мантийных геосферах, сделан вывод [150,156] 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 [155,156,176], что континенты движутся по зонам тектонических срывов на глубинах до 450-500км. 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 в больших глубинах вследствие изменчивости термобарического условия могут существовать зоны частичного плавления и предполагают, что по ним могут происходить тектонические срывы. Принимается, что глубже 800 км должны преобладать деформации сублатеральных срывов.

На основе экспериментальных исследований порообразующих минералов в условиях огромных статистических и динамических термобарических воздействий, выполнен большой цикл работ, с целью обоснования результатов данного класса геолого-геофизических задач [5,7,14,40,63,66,68,88,91,93,97,111,112,118,138,146,151,160]. Показано [40,71,112,113], что под (динамическим и статическим) термобарическим воздействием происходят изменения механических и прочностных характеристик веществ при различных структурных фазовых переходах. Экспериментальные исследования [71], расчеты диаграмм состояния [126] и данные по метоморфозму [108] показали, что при высоких термобарических условиях, существующих в коре и мантии Земли, большинство порообразующих минералов подвергаются различного рода микроструктурным превращениям (фазовые переходы, химические реакции). Особенное внимание уделено исследованиям скачков плотности, изменения объемного модуля сжатия и теплоту превращения. В процессе превращения понижается предел прочности и изменяется характер разрушения. Активизированным зонам 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 нарушенных кристаллической решетки на новые – свободные от этих нарушений. В этом процессе происходят падения прочностных характеристик, рост деформируемости и уменьшения (по крайней мере, некоторых) упругих модулей претерпевающие превращения вещества [112,151]. Развитие аномалии линейных упругих свойств имеет место только в случае достаточно быстрой кинетики метаморфического превращения, а возникновения аномалии прочностных свойств слабо лимитируются этим параметром.

Приведенные экспериментальные факты и научные представления положены в основу модельных исследований о строении 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 генезиса глубинных сдвиговых зон, выявленных в нижней коре и в верхней

мантии [30,70,162]. В [141] объяснены природа больших относительных перемещений слоев литосферы, образование некоторых геологических структур, механизмы ряда поверхностных и глубокофокусных землетрясений. В [40,112] 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 сеймотектонических 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 [84,101,134] и образовании в средней коре механически ослабленных слоев.

Вышеизложенный обзор результатов геолого-геофизических исследований свидетельствует, что в строении литосферы, средней и нижней мантии существуют механические ослабленные (сдвиговые) зоны. Тектоникой 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 [63,66,71,93,111-113,150,151]. 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 [38], которая в последующем была обобщена и для случая неоднородности, связанной с температурными полями [40]. 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 Φ , 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 с истечением геологического времени, указанные факторы, наряду с напряженным состоянием среды, оказывают решающее влияние на физико-механические и плотностные свойства.

Прежде чем перейти к изложению основного материала уместно сделать следующие замечания. В данной статье не ставилась целью обсуждение или критика результатов аналогичных работ других авторов, в связи с чем, кроме краткого обзора, ссылки на многие публикации не приведены. По мнению автора, существование различных точек зрения являются естественным, и появление новых результатов способствует дополнению наших сведений о сложных явлениях и процессах. Кроме того, не должно создаться также впечатление о том, что в статье сложнейшие многосторонние проблемы образования и развития тектоники и внутреннего строения Земли решаются, как задачи о механическом движении. Тектоника и внутреннее строение Земли связаны многообразными геологическими, геохимическими, геофизическими и т.д. процессами. Все эти процессы в той или иной степени участвуют в тектонофизических и геодинамических изменениях,

проявлениями которых являются движения и деформации. Поэтому эти фундаментальные параметры (в классической геодинамике и тектонофизике это является общепринятым) с учетом вышесказанного замечания использованы для разработки новой теоретической концепции.

2. Теоретические основы геодинамико-тектонически и структурной эволюции Земли.

Вышеизложенный обзор опубликованных работ и анализ их результатов показывают, что в настоящее время созданы различные модели тектонического и структурного развития Земли. Несмотря на достигнутый огромный прогресс в различных направлениях, по данным вопросам до сих пор отсутствует теоретический подход, позволяющий обосновать тектоническую и структурную эволюции Земли с единой теоретической позиции. Остаются многие дискуссионные вопросы и нерешенные проблемы геологии и геофизики. Формулировалось мнение о том, что для достижения дальнейшего развития в решении этих фундаментальных вопросов необходимо разработать интегрированные подходы, т.е. использовать современные возможности математики, механики, физики, химии, информатики и т.д. совместно.

Далее излагаются основные положения одного из возможного интегрированного подхода и приведены ряд конкретных модельных результатов по различным вопросам тектоники и структурной геологии, полученные при его применении. Данный подход автором развивается уже более 30-ти лет и отдельные результаты по различным вопросам опубликованы в обобщающих работах [1,2,45-53,90,118-124,126-129,181]. Накопленные материалы и полученные результаты позволяют развивать их в виде нового подхода в теоретических исследованиях геодинамико-тектонической эволюции Земного шара.

Уместно отметить, что ранее работы автора публиковались под фамилией Кулиев Г.Г. (Kuliev G.G.). В пост Советское время, согласно паспортным данным автор уже публикуется под фамилией Guliyev H.H.

В качестве исходного положения в создании неклассической теоретической модели НТМ использованы предположения об эволюции шаровидной Земли, заполненной сплошной деформируемой композитной средой (в понимании механики и физики). Считается, что за 4,6 – 4,7 миллиарда лет происходит тектоническая и структурная эволюция (состоящий из непрерывных и скачкообразных, в том числе и катастрофических изменений) этого шаровидного деформируемого тела.

В исследованиях деформируемых систем имеются два главных вопроса, на которые необходимо ответить, прежде чем перейти к конкретным разработкам. Во-первых, нужно определить: какая среда подвергается деформированию, вообще воздействию? Во-вторых, почему происходят изменения (в том числе деформирования), т.е. что является причиной этих процессов?

Первый вопрос подробно рассмотрен в [2,121]. Геологическая среда моделируется в виде изотропных и анизотропных сжимаемых или несжимаемых однородных и неоднородных материалов, которые могут испытывать малые и большие упругие, упруго-пластические, упруго-вязкие, упруго-вязкопластические и т.д. деформации. Деформации могут быть непрерывными и разрывными в различных стационарных и нестационарных процессах при статических и динамических воздействиях.

Второй вопрос с точки зрения развиваемого подхода также рассмотрен [2,121]. Казалось бы, ответ и на этот вопрос ясен. Существуют три группы разнообразной природы воздействий на тело Земля - космогенная, экзогенная и эндогенная. Однако, во многих конкретных исследованиях, возникает резонный практический вопрос: среди этих трех групп воздействий именно какие составляющие имеют основное значение, какие второстепенные? и т.д. Аналогичный вопрос возникает и в проблеме тектоники. Дискусируются вопросы типа: подвержены ли тектонике глубокие зоны мантии? Если да, то какие основные источники воздействия, вызывают эти процессы? Этот круг вопросов в данной работе рассматривается с позиций концепции вечного круговорота материи.

3. Концепция вечного круговорота материи (ВКМ) [90,120].

Данная концепция позволила предложить общие физические принципы геодинамико-тектонической эволюции Земли [119, 181].

Считается, что причиной эволюции, являются разномасштабные (в микро, обычных и глобальных) движения, вызываемые везде и всегда разнообразными процессами взаимопревращения энергии и вещества друг в друга с охватом всех их агрегатных состояний. Реализуемые масштабы движения определяются наложенными связями (термин аналитической механики) и соотносятся геологическому времени. Связи определяют совокупности ограничения, возможные формы и пути движения. В аналитической механике давно созданы многочисленные варианты моделей связей и соответствующие им теории [100]. В зависимости от геометрического масштаба и скорости течения, эти движения в теоретическом плане описываются в пределах квантовой механики, механики Ньютона и релятивистической механики. Существующий, и частично наблюдаемый «мировой порядок» управляется принципом экстремума действия. Независимо от форм движений (поступательные, вращательные, пульсирующие, циклические и т.д.), основным механизмом эволюции является последовательные смены неустойчивых состояний равновесия (концепция неустойчивости [1,120-123]). Вследствие смены переплетенных (вложенных) высокопериодных (миллиарды лет), длиннопериодных (сотни миллионов лет), среднепериодных (миллионы и десятки миллионов лет), короткопериодных (десятки и сотни тысяч лет), мелкопериодных (сотни лет) и т.д. неустойчивых равновесных состояний происходит эволюция Земли и формировалась ее нынешняя современная геодинамика – тектоническое неустойчивое состояние равновесия. Естественно, что наряду с вышеуказанными, существуют также гиперпериодные смены неустойчивых равновесных состояний вселенских и космических масштабов. В последних случаях периоды измеряются уже не геологическими, а астрономическими временами и масштабами. Такое разделение разнопериодных неустойчивых равновесных состояний в теоретических модельных исследованиях является в той или иной степени отражением основных этапов эволюции Земли (в геологии выделяются 9 этапов [134]) и разномасштабных циклическостей в тектонической истории Земли. В частности, в осадочных толщах, принимая, что геологическая циклическость – явление многопорядковое, выделяют [94] 17 порядков циклов: от самых крупных, длительностью в сотни миллионов лет, до самых короткопериодических – годовых (ленточные глины). Под циклическостью в геологии понимается [134] квазипериодическое повторение определенной последовательности событий или стадий развития, плавно переходящих одни в другие или выраженные скачками в этом развитии.

Причиной взаимопревращения, т.е. круговорота энергии и вещества независимо от масштаба, является их противоположные стремления. Энергия желает стать свободной, т.е. как бы избавиться от массы. Поэтому энергия пытается уничтожить вещества и превратить ее в свободную энергию. В свою очередь вещества во всех агрегатных состояниях хотят приобрести форму с минимальной потенциальной энергией, т.е. превратив все виды энергии в вещества, приобрести состояние, если не полностью, то хотя бы близкую покою. В однородных полях для изотропных сред это форма шара. Данная, вечная, не останавливающаяся ни на один миг антагонистическая борьба между энергией и веществом везде «провоцирует» различные интенсивности, плотности, формы (поступательные, вращательные, колебательные и т.д.) и масштаб движения.

При соответствующих условиях эти многообразия движений обеспечивают образования разномасштабных тектоно-геологических структур и транспорта энергии и вещества в недрах Земли (как отмечается в [107] формирование восходящих и нисходящих потоков, образование горячих суперплюмов, затягивание холодного литосферного материала в зонах субдукции, формирование магматических, вулканических и сейсмических очагов, транспорта глубинных флюидов в верхние горизонты земной коры и т.д.).

В парадигме эволюции Земли нет необходимости доказывать участие в ней носителя массы-вещества (минералы, породы, состоящие из различных химических элементов) и разнообразной формы и вида энергии. Не прекращаясь никогда, во всех поверхностных и внутренних точках геосфер Земли с различными скоростями, происходят разномасштабные взаимопревращения энергии и вещества друг в друга, вызывающие и поддерживающие протекание различных геодинамико-тектонических процессов.

Фактические результаты различных геолого-геофизических исследований (обзор некоторых из них приведенные выше) подтверждают этот теоретический вывод. Сейсмотомографические

исследования последних двух-трех десятков лет, наряду с наблюдаемыми на поверхности Земли движениями (геодезические и GPS измерения), движениями во внутренних частях коры (скважинные данные, данные обнажений) и движениями происходящих в более глубоких областях литосферы, обогатили наши знания информацией о различных формах и масштабах движений, происходящие во всех зонах мантии. Результаты геолого-астрофизических и геомагнитных исследований показывают на наличие движений также в ядре Земли. Решены балансовые проблемы круговорота углерода, связанные с поступлением подвижного углерода из Космоса и геохимическими механизмами утилизации этого углерода на нашей планете [95,96]. В данной работе построена теоретическая модель «планетарного механизма» земной коры по В.И. Вернадскому и на ее основе исследованы некоторые геохимические аспекты действия этого механизма в разные периоды геологической истории Земли. Глубокий анализ глобального геохимического круговорота на Земле углерода и воды с учетом их поступления на нашу планету в составе галактических комет, позволил автору дать собственную научно обоснованную оценку нефтегазового потенциала земных недр. В рамках данной модели показано, что вода, кислород и углекислоты с участием живых существ, пребывают в совместном круговороте в рамках единой геохимической системы. Показано, что масса углерода, поступающего в земную кору на нисходящей ветви круговорота воды, оказывается соизмерной массе углерода, поднимающегося на поверхность из недр на восходящей ветви круговорота, что означает устранение первого балансового противоречия круговорота углерода. Предполагается, что биосферный круговорот охватывает всю биосферу в целом, включая осадочный чехол, где сосредоточены основные залежи нефти и газа. Получено решение второй балансовой проблемы, т.е. объяснено, что на нисходящей ветви круговорота в земную кору опускается окисленный углерод биогенного происхождения и вследствие деструкции органических молекул получают углеводородные растворы полигенной природы, а на восходящей ветви круговорота из минеральных соединений в результате реакций каталитического синтеза также получают углеводородные растворы. Вышеизложенные результаты автора, позволили ему предложить принципиально новую биосферную концепцию нефтегазообразования. Концепция включает в себя механизмы биогенного и абиогенного синтеза углеводорода в недрах и условия перераспределения углеводорода над поверхностью планеты

Следовательно, в предлагаемой теоретической модели вопросы тектонической и структурной эволюции Земли рассматриваются в виде последовательности смены неустойчивых состояний равновесия, проявляющихся в форме возмущений (аномалий) фонового непрерывного развития шаровидного (заполненной композитным материалом) деформируемого тела. Существования процессов непрерывного развития фона и возмущенных состояний являются показателями длительных (геологически) тектонических процессов. Различные специфические возмущенные состояния характеризуют образование разнообразных структурных элементов разного масштаба. Они возникают при достижении определенных критических соотношений между геометрическими, разнообразными (произвольной природы) силовыми и деформационными параметрами фонового состояния в локальных, региональных и обще - планетарных масштабах.

В отличие от стандартных объектов (традиционные материалы, конструкции, машин-механизмы, сооружения и т.д.) механики, физики и др. разделов техники для исследования проблем внутреннего строения Земли и тектоники целесообразно ввести в методiku исследования понятия «геолого-геофизической» среды. Дело в том, что в естественном состоянии, любого масштаба геологические объекты (породы, пласты, бассейны, микро и макро плиты, континенты и т.д.) всегда находятся под воздействием множества разнообразных физических полей (гравитации, электромагнитных, ротационных и др.). Нет их начальные не подверженные воздействиям состояния, и в связи с этим, далее в данной работе под средой принимается это обобщение. Где возникнет необходимость, будут даны дополнительные объяснения.

Согласно концепции ВКМ воздействия на среды означает разнообразные процессы приема, переработки, и передачи различной формы энергии (ПППЭ). Эти процессы в целом являются функциями обобщенных переменных, таких как разнообразные формы энергии, различных геолого-геофизических сред, скорости, длительности и геометрические масштабы реализации и т.д.

В данной работе на основе вышеизложенных предпосылок и представлений, показывается, что одним из главных факторов, определяющих внутреннюю структуру и тектонику Земли являются процессы ПППЭ сред и их результаты. Часть попадающей на среды энергии отражается, часть передается на соседние объекты. Среда также излучает часть энергии. Оставшаяся часть энергии внутри среды перерабатывается. При этом один из главных механизмов переработки связан с процессами деформирования. Под воздействием вышеуказанной оставшейся части энергии, в среде происходят разнообразные, разно-интенсивные, разно-скоростные и разномасштабные процессы медленных, скачкообразных, непрерывных и разрывных деформаций. Эти процессы с одной стороны участвуют в переработке энергии, с другой стороны они поддерживают ПППЭ в целом, т.е. вечный круговорот материи.

В различных этапах вечного круговорота материи рост энергетического потока обеспечивает переход открытой равновесной системы от чисто энтропийного процесса к поглощению энергии, ее преобразованию, выходя на новые параметры организации энтропийного процесса и диссипации энергии на новом уровне.

Накопленный опыт по применению неклассически линеаризированной теории тектонофизики к проблемам современной геодинамики [1,45-53,118,120-122,124,127,128,129] и новая модель развития литосферы [2] показывают, что приемлемые ответы на выше поставленные вопросы, с учетом изложенных недостатков, возможно получить в рамках неклассического линеаризированного подхода.

4. Основные принципы построения НТМ [119]

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 [10,33]. В рамках этого подхода получается специфическое линейное приближение в нелинейной теории. Специфичность состоит в том, что линеаризация не проводится в малой окрестности конечной точки А начального состояния, а производится в малой окрестности произвольной точки М актуального состояния (рис.1).

В качестве модели Земли рассматривается общепринятая слоистая конструкция шаровидного тела с внешней многослойной деформируемой твердой оболочкой. Многослойная оболочка является механической моделью коры и мантии, на внутреннюю и внешнюю поверхности которой действуют космогенные, экзогенные и эндогенные нагрузки различной природы. Геологическая среда, заполняющая слои оболочки, состоит из осадочных, метаморфических и магматических пород, которые моделируются либо нелинейно-упругими, либо упруго-пластическими, либо вязко-упругими, либо еще более сложными деформируемыми сжимаемыми и несжимаемыми материалами [1,2,118-123]. Одним из главных факторов, влияющих на модельные результаты, является выбор формы упругих потенциалов, который определяет зависимость между напряжениями и деформациями. Обоснованное моделирование этих связей позволяет приблизить модельные построения к аналогичным экспериментально измеряемым результатам.

Исследования процесса деформирования рассматриваемой системы, в зависимости от поставленных целей, выполняются либо в пределах континуального приближения, либо в пределах кусочно-однородной модели среды. В качестве основных систем соотношений и разрешающих уравнений нелинейной модели применены соответствующие зависимости общей нелинейной теории механики деформируемых твердых тел с соответствующими модификациями.

В отличие от механики деформируемого твердого тела, в геодинамике при решении данного вопроса появляется ряд проблем, вытекающих из специфики геологических сред. Основные сложности связаны с моделированием связи "напряжения - деформации" на различных стадиях деформирования, а также с экспериментальным определением линейных и нелинейных физико-механических свойств горных пород и их экстраполяцией на реальные условия и масштабы. В связи с этим, в геодинамике строго отличают истинные и эффективные значения используемых параметров. Следует отметить, что для горных пород статические и динамические методы определения физико-механических и иных свойств могут дать существенно различные

конечные результаты в зависимости от величины нагрузок, способа их приложения, частоты волновых полей, структуры среды и т.п. С другой стороны, для одних и тех же горных пород в различных ситуациях (при различных геодинамических режимах) необходимо использовать соответствующие, зачастую отличающиеся друг от друга, исходные данные. В частности, для одного и того же скелета горной породы эффективные значения параметров физико-механических свойств будут отличаться в случаях сухой и флюидонасыщенной сред, что необходимо учитывать на различных стадиях теоретического моделирования. Дело в том, что горные породы, и особенно осадочные, практически всегда ведут себя не как материалы, а как конструкции с остаточными деформациями. Это свойство существенно проявляется при исследовании их физико-механических свойств динамическими методами. Например, в пределах ультразвуковых диапазонов частот волн породы ведут себя как деформируемые конструкции со сложной структурой. Эти же породы, относительно низкочастотных сейсмических волн, проявляют себя как однородные изотропные материалы.

В механике деформируемого твердого тела исследуются проблемы напряженно-деформированного состояния, связанные с традиционными (металлическими, композитными, стекловидными, керамическими, деревянными и т.д.) материалами, конструкциями и сооружениями. Их начальное безнапряженное состояние известно с достаточной точностью, масштабы изучаемых объектов обычно позволяют осуществлять непосредственное наблюдение и управление происходящими процессами. Сказанное существенно облегчает принятие обоснованных упрощающих предположений как на стадии формулирования проблемы, постановки задачи и теоретического моделирования, так и на стадии создания алгоритмов и методов решения. Методы решения являются либо точными, либо приближенными; при этом линеаризация обычно проводится в окрестности начально-недеформированного состояния. Сказанное выше составляет теоретическую основу классических моделей механики деформируемого твердого тела.

В геологии, геофизике и горных науках дела обстоят значительно сложнее. Осадочные, метаморфические и магматические горные породы формировались, эволюционировали, разрушались в течение промежутков времени, исчисляемых миллионами и миллиардами лет. В недрах Земли нет безнапряженного состояния, которое можно было бы принять в виде начального. Породы постоянно находятся под огромной величиной произвольно изменяющихся напряжений многообразной природы. Характер проявления и воздействия напряжений в разных ситуациях различен. Периодичность и длительность их действия исчисляются секундами, часами, сутками, годами, веками, эпохами. Геологические объекты по масштабам также многообразны. Их линейные размеры могут измеряться миллиметрами и тысячами километров. При этом многие явления и процессы происходят на различных, зачастую недоступных для непосредственного наблюдения, глубинах недр Земли. Естественно, что способность деформирования различных горных пород значительно отличается как по величине, так и по характеру, т.е. существует огромное разнообразие в физико-механических свойствах геоматериалов и условиях деформирования. В связи с этими огромными временными и геометрическими параметрами и недоступностью геологических объектов, нет возможности для непосредственного наблюдения за происходящими процессами.

Все эти факторы и накопленный опыт обуславливают применение неклассического способа линеаризации полной системы уравнений, соотношений, краевых и начальных условий общей физически и геометрически нелинейной теории. Сущность этого способа заключается в том, что линеаризация проводится последовательно, в малой окрестности актуального, иными словами, реально существующего деформированного состояния. При этом любой природный или искусственный процесс рассматривается в виде двух качественно отличающихся состояний - невозмущенного (которое, в свою очередь, состоит из естественного и начального состояния) и возмущенного. Считается, что в невозмущенном состоянии все величины и параметры исследуемого процесса известны, или хотя бы известны методы их определения. Заметим, что при этом величины этих параметров могут быть произвольными, а задача по их определению - нелинейной. Аналогичные величины и параметры (в том числе новые) в возмущенном состоянии являются неизвестными и искомые параметры, по сравнению с невозмущенными, являются достаточно малыми (но небесконечно малыми), что позволяет произвести линеаризацию с

достаточной степенью точности. Получаемые линейные дифференциальные уравнения относительно возмущений, в качестве коэффициентов содержат параметры линейных и нелинейных физико-механических свойств среды, силовых и геометрических параметров начально-напряженного состояния.

Общее перемещение состоит из суммы перемещений начального состояния и возмущений. Известно, что основные системы классических линейных теорий, где линеаризация проводится в окрестности естественного недеформированного состояния, написаны относительно перемещений только начального состояния, а в качестве коэффициентов в них входят лишь параметры, характеризующие линейные физико-механические свойства среды.

В начальном состоянии можно выделить две стадии: естественную (недеформированную) и начально-деформированную. При этом возможно рассматривать задачи с малыми линейным и нелинейным и большими нелинейными деформациями, соотносить все измеряемые величины на единицу площади либо естественного, либо начально-деформированного состояний. В математическом отношении при составлении основных уравнений и соотношений неклассической линеаризованной теории, в указанных двух случаях, удобно использовать лагранжевые, а при измерении величин на площади возмущенного состояния - эйлеровы координаты. Также различаются отсчетные и сопутствующие системы координат. Все эти отличия относятся к математическим формализациям. Тем не менее, их учет принципиально важен, так как при сопоставлении теоретических результатов с экспериментальными необходимо сравнивать параметры и величины, определенные и смоделированные при одинаковых условиях и предположениях.

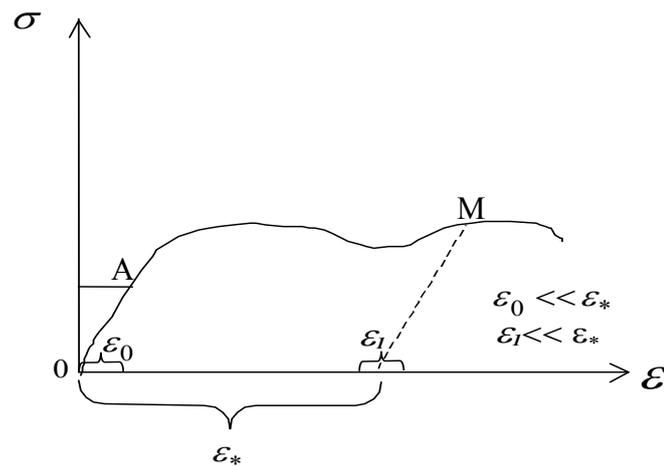


Рис.1 Способ линеаризации

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 специфического возмущения относительно параметров фонового (начального) состояния. Это положение находит отражение в методе линеаризации, в структуре основных уравнений и краевых условий и в методах решения исследуемых задач [33,121,122]. 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 [159] 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 (рис.2).

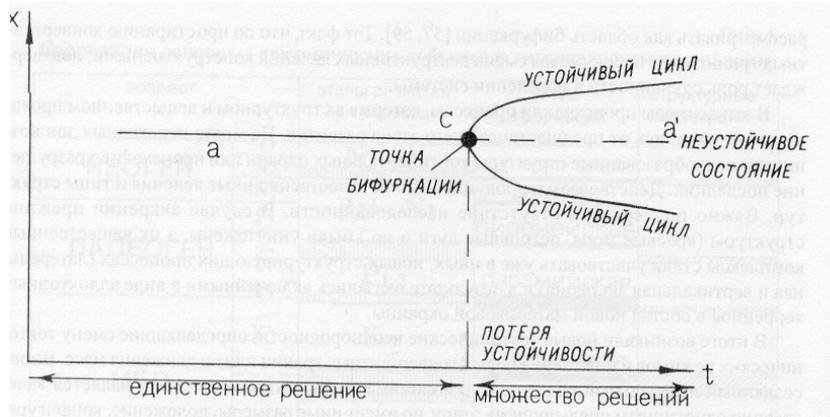


Рис. 2 Диаграмма бифуркаций

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 [1,2,121,122]. В рамках модели неустойчивости явления бифуркации имеют место не только для общегеологического эволюционного, но и для любого масштаба современного геодинамического развития. Линеаризованный подход [33,121] позволяет в выбранной модели определить точки бифуркации c , судить о термодинамической ветви a и в малой окрестности точки бифуркации c о существовании того процесса, который исследуется. В [159] 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. 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, хотя возможно, что достаточно долгое время в этих в целом неустойчивых состояниях состоит устойчивый цикл развития. 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. стадиях 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 нелинейных задач также требует предварительного 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 [121]. Следовательно, исследование

линеаризированных 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 [33]

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

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, приложенных в возмущенном состоянии, отнесенные к единице площадки начального деформированного состояния; ρ - 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 [33].

В (1)-(3) при отсутствии начальных напряжений, формально принимая, что u_α - 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 случае однородных начальных напряженных состояний основные уравнения движения (1) не классически линеаризированной 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. Следовательно, неклассически и классически линеаризированные 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 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. Принципиальное отличие состоит в том, что вместо краевых задач математической физики, уже рассматриваются задачи на собственные значения. 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 любой природы геофизических полей и 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 геофизических полей и блоков учитываются при решении более простых краевых 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.

Более наглядно структура НТМ и ее отличия от классического линейного подхода схематически показана на рис. 3.

Различные горные породы и слои в структуре литосферы силовые воздействия от соседних слоев принимают и передают различным образом. Эта способность является их свойством. При моделировании силовых воздействий последние разделяют на два класса: первый класс - это "мертвые" силы, которые в процессе деформирования сохраняют свои величины и первоначальные направления действия (в физике их называют "консервативные силы"); второй класс составляют "следящие" силы, которые в процессе деформирования могут изменить как свои величины, так и направления действия (их в физике называют "неконсервативные силы"). Из физических соображений следует, что жидкие, пластичные и менее жесткие среды реализуют неконсервативные, а более жесткие среды - консервативные силы. В процессах медленных деформаций (более точно - при достаточно малых изменениях границ) силовые воздействия можно достаточно адекватно смоделировать в виде консервативных сил. При быстрых процессах деформирования, например, при смене состояний равновесия (потери устойчивости), различия консервативных и неконсервативных сил имеют принципиальный характер, как в теоретических, так и в практических аспектах. В случае задания поверхностных нагрузок в виде неконсервативных сил, составляющие P_j определяются в виде [33,106]

$$P_j = \tilde{P} \left(N_j \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\alpha} - N_\alpha \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_j} \right), \quad (4)$$

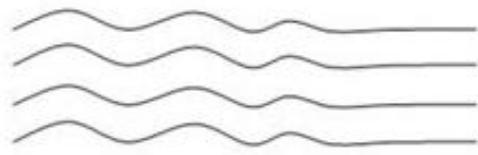
где \tilde{P} - параметр интенсивности внешних нагрузок. Для консервативных сил $P_j = 0$.

Неклассическая линейаризация открывает ряд новых возможностей, среди которых можно выделить следующие. Во-первых, основные системы линейных уравнений (1) охватывают существенно больше процессов и явлений. Во-вторых, в коэффициенты уравнения (1) входят различные механические (в том числе реологические, петрофизические и т.д.), геометрические и силовые параметры, что позволяет, исходя из качественной теории дифференциальных уравнений, получить ряд необходимых зависимостей между этими параметрами, имеющими фундаментальное значение в проблемах устойчивости, прочности и волновой динамики деформируемых сред. И, наконец, в третьих, решения систем дифференциальных уравнений (1) строятся в зависимости от корней соответствующих характеристических уравнений. Это особенно важно, так как фундаментальные свойства решений (не зависящие от краевых условий) классических моделей теоретически обоснованно определяются лишь в зависимости от линейных физико-механических характеристик среды, а другие зависимости определяются либо эмпирически, либо гипотетически. Уравнения же типа (1) позволяют получать такие теоретически обоснованные зависимости также с учетом и нелинейных физико-механических свойств, геометрических и силовых параметров.

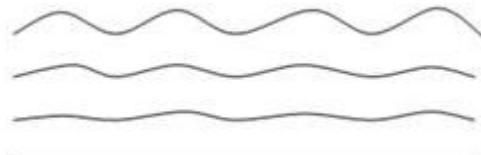
Можно провести классификацию математических задач линейаризованной теории типа (1)-(3) по коэффициентам $\omega_{ij\alpha\beta}$. В случае, когда начальные напряженные состояния являются однородными, физико-механические, реологические и петрофизические свойства среды от

пространственных координат не зависят. При этом величины $\omega_{ij\alpha\beta}$ являются константами и задачи типа (1)-(3) сформулируются относительно систем линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Применение метода представления общих однородных решений, в комбинации с различными аналитическими методами математической физики, позволяет аналитически решить многие теоретически и практически важные задачи, как при консервативности, так и при неконсервативности внешних воздействий. Нарушение хотя бы одного из вышеперечисленных условий приводит к рассмотрению задач типа (1)-(3) относительно систем линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Это значит, что коэффициенты $\omega_{ij\alpha\beta}$ являются не константами, а функциями пространственных координат. Для решения таких задач эффективными являются вариационные методы, методы степенных рядов, методы геометрической оптики скомбинированные с методом параболического уравнения, методы численного интегрирования и т.д.

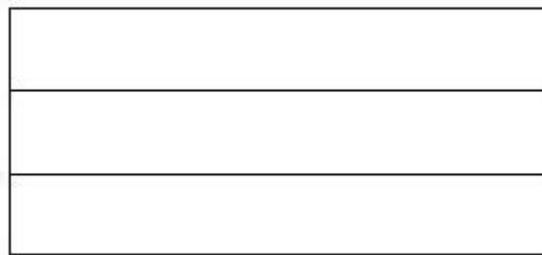
Разнообразные формы структур моделируются различными формами неустойчивости (рис. 4), которые учитываются при выборе вида решений задач (1) – (4).



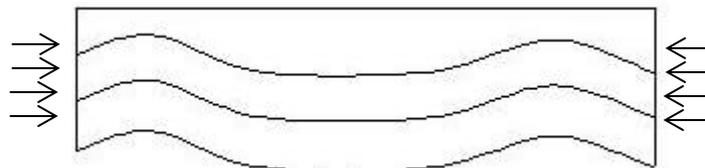
**Приповерхностная форма неустойчивости
в торцевых воздействиях**



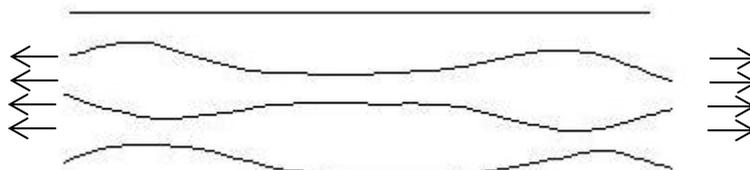
**Приповерхностная форма неустойчивости
при фронтальных воздействиях**



**а) регулярная структура до
потери устойчивости**



**б) изгибная форма
устойчивости**



в) шейкообразования

Рис. 3. Модельные формы внутренних и приповерхностных структурообразований



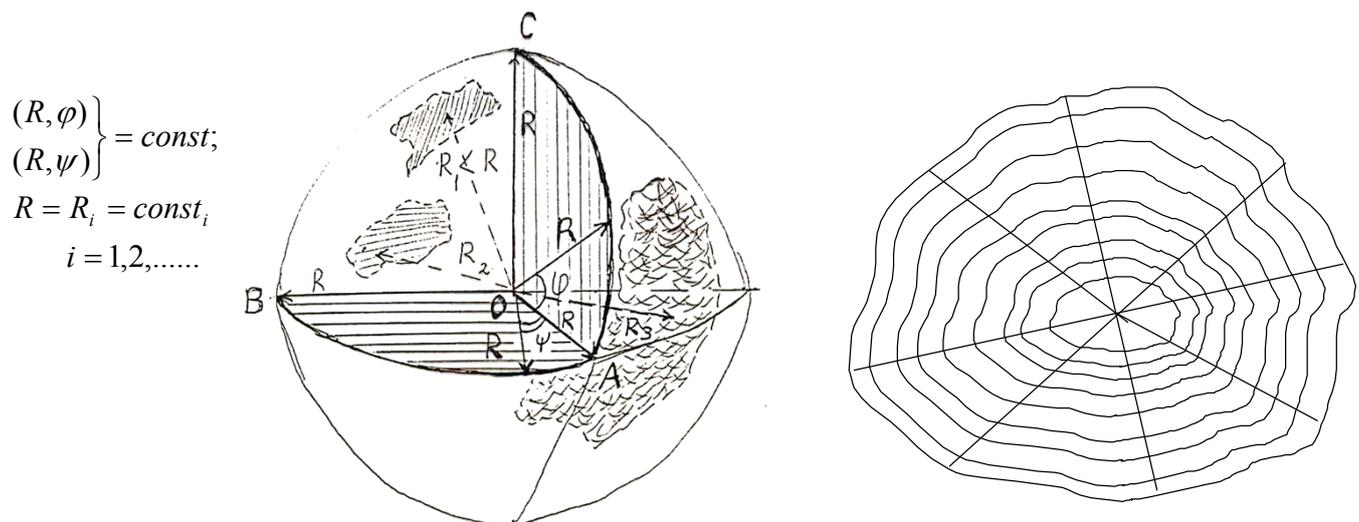
Рис. 4. Варианты создания моделей линеаризованных теорий

В случае упруго-пластического деформирования, неклассическая линейаризация открывает новые возможности для получения приближенных решений. Предполагая, что зоны разгрузки могут появляться лишь в начально-деформированном состоянии и рассматривая процессы активного нагружения в возмущенном состоянии, удастся решить сложные нелинейные задачи. Такой подход в теории упруго-пластического деформирования называется обобщенной концепцией продолжающегося нагружения [106,117].

Из механики известно, что параметры гибкости, жесткости и т.д., связанные с геометрией деформируемого объекта также оказывают на поведение деформируемого тела существенные влияния. Следовательно, наряду с физико-механическими свойствами среды, на процессы накопления и высвобождения энергии при геодинамических изменениях существенные влияния могут оказать также геометрические параметры рассматриваемой локальной зоны. Основными геометрическими параметрами в рассматриваемых задачах могут быть параметры структуры, размеры зон и т.д. Важнейшим геометрическим параметром в задачах структурообразования и тектоники являются геометрические параметры трещин, разделительные поверхности, разломные поверхности и т.д. имеющих в рассматриваемых зонах.

5. Критические параметры напряжений и деформаций процессов разрушения и неустойчивости.

Качественный анализ системы уравнений (1) показывает [51,52,106,121,128,129], что она имеет три взаимно перпендикулярных семейства характеристических поверхностей (рис.5).



Характеристические поверхности в сферической системе

Характеристические линии в полярной системе координат

В осесимметричном случае характеристическими являются цилиндрические поверхности

Рис. 5 Характеристические поверхности в различных координатных системах

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 [121]. Оказывается, что при этом на этих линиях и

поверхностях деформации терпят разрыв. Наглядным примером, экспериментально подтверждающей этого теоретического вывода НЛП, является хорошо известная картина разрушения лобовых стекол автомобилей при попадании к ним камней. Исходя из этих фундаментальных теоретических результатов, в [51,52,128,129] 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 [51,52,122,128,129] сделано предположение о том, что на горизонтальных поверхностях в различных глубинах Земли могут возникнуть латеральные разломы, соответствующие сферически концентрическим характеристическим поверхностям (рис.6).

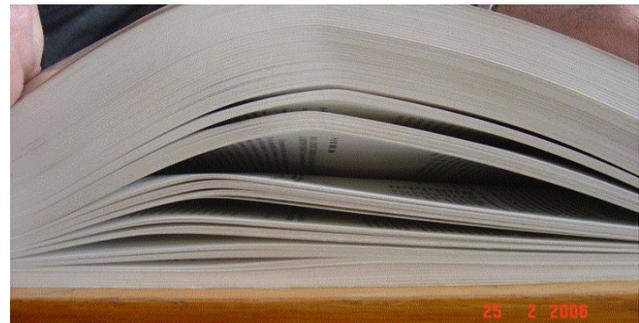
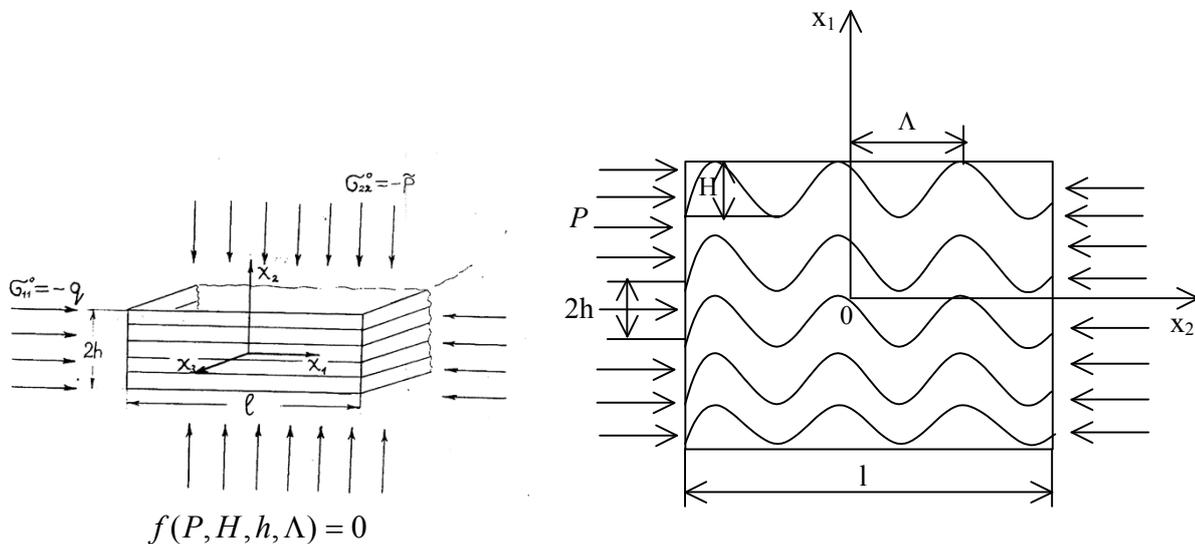


Рис.6 Разрушения путем расслаивания (размочаливания)

Данное теоретическое предсказание созвучно с выше рассмотренными геолого-геофизическими фактическими данными о сдвиговых, покровных, надвиговых, волноводных (разуплотненных) и неоднородных структурах, имеющих 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 [51,52,122,128,129] 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 геометрическом отношении. В геологии же вертикальные и латеральные разломы, кроме геометрических параметров, также будут отличаться по генетическим, морфологическим, литологическим, хронологическим и др. 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 и сдвига. 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, в связи с этими различиями, ученые до сих пор не присвоили название латеральных разломов некоторым ослабленным и разуплотненным зонам в недрах Земли, аналогично 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 сквозь мантийные каналы и сублатеральные зоны срыва, считаются дифференцированные тектонические перемещения мантийных масс под действием энергетических градиентов [156]. Предполагается, что конвективные потоки путем механического захвата отдельных блоков мантии разрушают ее слоистую структуру, в результате чего образуются сквозь мантийные 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 [51,52], основываясь на результаты исследования механизма разрушения слоистых композитных материалов [106], предложено, что одним из возможных механизмов образования латеральных разломов в недрах Земли могут быть разрушения с расслаиванием (размочаливания) при различных напряженных состояниях (рис.4). 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 хрупкому, пластическому и т.д. приповерхностной неустойчивости и разрушению [121]. Например,

$$\text{При } \pi \frac{h}{\ell} < \left[\frac{3}{2}(1-\nu)(1+k) \right]^{\frac{1}{2}}; \quad \pi \frac{h}{\ell} < \left[\frac{3}{2}(1-\nu)(1-k) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

происходит изгибная форма потери устойчивости тонкой полосы мощностью $2h$, находящиеся внутри среды (рис. 6) без разрушения соответственно, в случаях задания на обеих боковых поверхностях «мертвых» и «следящих» нагрузок. В случае нарушения условия (5), при достигнутом уровне внешних нагрузок, реализуется процесс разрушения путем расслаивания по типу «внутренней неустойчивости». Первая формула относится случаю одноосного сжатия

Величина критических сил потери устойчивости состояния равновесия тонкостенной ($\chi \ll 1$) полосы определяется формулой

$$P_{кр} \approx \frac{P_{эи}}{1+k-2kn}; \quad P_{эи} = \frac{\chi^2}{3} \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{A_{11}A_{22}}; \quad \chi = \pi m \frac{h}{\ell}, \quad (6)$$

здесь $P_{эи}$ - Эйлерова нагрузка, соответствующая потере устойчивости тонкой полосы при одноосном сжатии; $2h$ – плотность полосы; ℓ - длина полосы; $k = \frac{\sigma_{11}}{\sigma_{22}}$ - отношения напряжений сжатия, действующие вдоль длинных и коротких кромок полосы; m - число полуволн формы неустойчивости; $n = 0,1$ - соответствуют случаям действия консервативных и неконсервативных внешних нагрузок; A_{ij} - модули упругости второго порядка трансверсально-изотропного приближения.

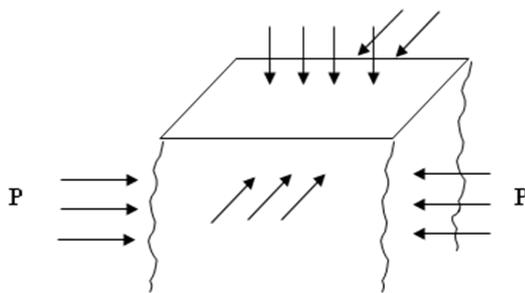
Сопоставляя эти результаты с аналогичными результатами поверхностной и «внутренней» неустойчивостью, можно судить, аналогичные предыдущим случаям, о механизмах разрушения.

В приповерхностных частях разломных зон величины критических нагрузок, приводящие к неустойчивости (по формам рис. 4) определяются в виде:

Случай анизотропного полупространства

$$(-\sigma_{11}^0)_{кр} \approx G_{12} \left\{ 1 - G_{12}^2 A_{11} A_{22} \frac{1 - 4kn + 6k^2 n^2 - 4k^3 n^3 + k^4 n^4}{(1-k)(A_{11}A_{22} - A_{12}^2)^2} \right\}$$

Случай несжимаемого полупространства при упруго-пластической деформации



$$(-\sigma_{11}^0)_{кр} \approx \frac{2}{3(k+1)} E_k \left(1 - \frac{k^2 + 1}{2(k+1)^2} \frac{E_k}{E_c} \right)$$

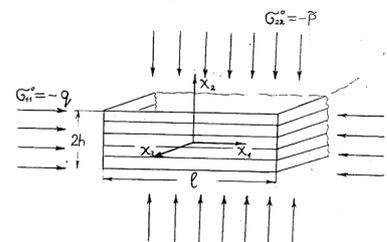
$$(-\sigma_{11}^0)_{кр} \approx \frac{2}{3(k+1)} E_k \left(1 - \frac{(k-1)^2}{2(k+1)^2} \frac{E_k}{E_c} \right)$$

$\varepsilon = 0,4; n = 1$				
k	$-\frac{\sigma_{11}^{np}}{E_c}$	$-\frac{\sigma_{11}^{moo}}{E_c}$	$-\varepsilon_{11}^{np}$	$-\varepsilon_{11}^{moo}$
0,2	0,202469	0,193229	0,1214814	0,1159379
0,4	0,183479	0,178909	0,082565	0,08050949
0,6	0,164583	0,163079	0,049375	0,0489239
0,8	0,147782	0,147529	0,022167	0,02212947

Здесь E_k и E_c - соответственно касательные и секущие модели упругости среды.

Для трехмерных тел величины критических нагрузок структурной неустойчивости в анизотропном случае определяется в виде:

$$(-\sigma_{11}^0)_{кр} \approx \frac{P_s}{1+k-2nk} \left\{ 1 - \frac{1}{30A_{22}G_{12}} \left\{ 2(A_{11}A_{22} - A_{12}^2 + 3A_{12}G_{12}) + \right. \right.$$



$$+ \frac{5}{(1+k-2nk)A_{22}} \{2G_{12} \{A_{22}(A_{22} - A_{12}) + kA_{12}[A_{12} - A_{22}(1-4n)]\} +$$

$$+ 2(1-k \frac{1-n^2k}{1+k-2nk})A_{22}(A_{11}A_{22} - A_{12}^2)\} \}; \quad P_{\text{э}} = \frac{\chi^2}{3} \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{A_{22}}$$

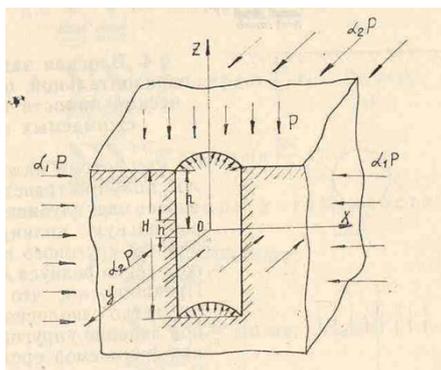
Таким образом, в пределах трехмерной неклассически линейризованной механики, разрушения материалов (пород) с трещинами и без нее при произвольном сжатии представляется в виде последовательности процессов структурного, поверхностного и «внутреннего» типов разрушения.

Причем, структурный тип, в основном, имеет локальный, поверхностный-локальный и полный (окончательный), «внутренний»-полный характер разрушения.

Вследствие смены состояний равновесия (возможность, которой возникает либо с наличием в структуре среды различных полосчатых, стержневых, балочных, блочных, цилиндрических тел, либо трещиноватостно, разломных структур, либо 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 реидным деформациям и перемещениям 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 обшей, а приразломной зоны по поверхностной форме.

Локальная неустойчивость в окрестностях цилиндрических поверхностей реализуются при различных однородных и неоднородных напряженных состояниях и исследуются с помощью вариационных методов [117]



$$p_{кр} = t_*(v, \rho)E$$

$$p_{кр.}^a = \mu$$

Рис. 7. Неустойчивость трехмерных тел в окрестности цилиндрических полостей

В случае неравномерного сжатия цилиндрических тел критические величины параметры нагрузки определяются с помощью следующих формул [116]

1. Ортоотропный сжимаемый материал

$$p_{кр} \approx \frac{p_{эп}}{1 + \beta_0 - 2\beta}; \quad p_{эп} = \frac{1}{4} \varepsilon^2 \frac{a_{33}(a_{11} + a_{12}) - 2a_{13}^2}{a_{11} + a_{12}}; \quad \varepsilon = m \frac{\pi}{l} R;$$

2. Линейно-изотропный сжимаемый материал $P_{эл} = \frac{1}{2} \varepsilon^2 \frac{\mu}{\lambda + \mu} (3\lambda + 2\mu)$

Здесь λ, μ - коэффициенты Ляме.

3. Линейно-изотропный несжимаемый ($\lambda \rightarrow \infty$) материал $P_{эл} = \frac{3}{4} \varepsilon^2 \mu$

4. Трансверсально-изотропный материал, ось изотропии которого совпадает с осью ox_3

$$P_{эл} = \frac{1}{4} \varepsilon^2 E_3,$$

E_3 - модуль сжатия вдоль оси ox_3

5. Изотропные сжимаемые материалы при малых упруго-пластических деформациях

$$P_{эл} = \frac{1}{4} \varepsilon^2 \frac{KE_k}{K + \frac{1}{3} E_k}, \quad K = \lambda + \frac{2}{3} \mu$$

6. Изотропные несжимаемые материалы ($k \rightarrow \infty$) при малых упруго-пластических деформациях

$$P_{эл} = \frac{1}{4} \varepsilon^2 E_k$$

При достижении величин P критические значения, цилиндрическая разломная зона заполняется с более разуплотненной средой. В такой обстановке создается предпосылка для превращения некоторых таких зон в сквозь мантийные 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 реализуется массапоток, 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 массапоток 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 [150,156] о том, что тектоника играет важную роль также в средних и нижних мантийных процессах.

В геологии и геофизике структуры разломного типа (спрединговые 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, учеными рассмотрены с различных точек зрения [4,9,11,15,23,27,28,30,31,35,36,42,55-62,70-72,74,76,80-87,89,97,101,102,110,114,133,138-140,143,145,146,148,149,153,155,156,161,163-166,173-

177,182,184]. Число публикаций по данной тематике огромно. Здесь приведены ссылки лишь на обобщающие работы последних лет, идеи и результаты которых в той или иной степени созвучны с вышеизложенными результатами 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 [152-157], анализируя результаты 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 км 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 [23], 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 [149,156] о «проворачивании» мантийных оболочек относительно друг друга.

Показано [143,144], что Земной коре присуща блоковая делимость, которая на континентах достигает глубин 100 км.

Установлено [141], что в верхней мантии Гиндукуша и Памира сложное сочетание высокоскоростных и низкоскоростных объемов пород напоминает расслоенную коровую часть разреза.

В [24] сделан вывод о том, что разлом Сан-Андреаса на глубине 15-20 км, выполаживая превращается в субгоризонтальную поверхность срыва.

В [69] 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 [64,133]. 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 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 [132], механизмы адвективного течения [104], процессы тектонического течения и роль пластической деформации, как одного из ведущих структурообразующих процессов [135,136], экспериментальное и фактурное обоснование тектонических потоков [37,140] на основе экспериментальных и теоретических исследований создания представления о тектонических потоках и их реальное значение в формировании структуры Земной коры [147] так или иначе основаны на предположении о существовании различных разуплотненных, подверженных к существенно большим деформациям сдвиговых зон.

Доказано [132], 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 катаклиз, динамическая рекристаллизация и течение гранулированных сред [37]. Показателем подвижности пород служат пликативные изгибы верхней поверхности фундамента, глубинные диапиры, кристаллические протрузии и признаки тектонической расслоенности верхне и ниже-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 [98,137].

К настоящему времени предложен целый ряд сейсмотомографических моделей мантии Земли [16,19-22,24-28,31,32,41-43,55,57,59,62,67,69,72,75,77,81-83,85,86,89,115,141,143,144,150,154,167,180].

Установлена общая дисгармония строения мантии и существование на ряду с концентрическими геосферами Земли также и радиальных элементов глубинной структуры: сквозь мантийные суперплюмы легкого горячего материала - апвеллинги и компенсирующие их даувеллинги плотных и холодных масс [38]. 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 [102,146,177,179]. Принято [179], 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 [3,34,54,174,175].

Современные движения Земной коры по GPS-измерениям изучены [6,8,12,18,29,44,65,68,73,78,92,105,131,170,171,178,183] 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. [171]. Результаты GPS-измерений используются при изучении задач тектоники [6,92,105,131,171,178], характера межплитовых сцеплений и реологических эффектов в мантии [105], для идентификации среднесрочных деформационных предвестников землетрясений, основанный на сопоставлении закономерностей распределения перемещений во времени и после землетрясений по разломам и по механизмам землетрясений [68,105,131], мониторинге строительных работ [92] 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 [17].

Здесь уместно также остановиться на тезисе об относительной нелинейности, открытости саморазвивающейся диссипативной системы Земли, сформулированном в различных работах [1,121,159,173]. 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 [3,34,175], 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 спреддинговых зонах 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 необходимым. 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 процессов в эволюции Земли. Главное – то, что они взаимодействуют.

Аналогичный вывод следует также из концепции вечного круговорота материи и из общих физических принципов геодинамической эволюции Земли [120]. На основе линеаризованного подхода возможно предложить также оригинальный механизм вертикальных движений и горообразования.

Принятие факта о наличии новообразованных плит с большими степенями свободы [125] как по вертикали, так и по латерали в пределах различных платформ и, возможно, срединных массивов, позволяет предложить следующий механизм реализации вертикальных движений (в том числе поднятие глыб). Более легкие пластичные верхнемантийные массы по глубинным разломам и каналами плюмов поднимаются и нагнетаются в латеральные разломы на различных этапах литосферы, и на каждом уровне происходит вертикальное перемещение новообразованных плит как целых жестких тел. Таким образом, даже без привлечения процесса деформирования, происходящего в пределах самих новообразованных плит, в итоге суммарных перемещений реализуются вертикальные движения в целом. В результате по ходу, и по этому механизму могут образовываться складки глыбовые и нагнетания. Если такие новообразованные глыбы (плиты) образуются в консолидированном фундаменте, то их поднятие может привести к изменению знака кривизны оси сравнительно жесткого слоя в верхних частях коры. Образуются реактивные нагрузки, равные по величине критических сил, и сжимающие сравнительно жесткий слой, приводящие к потере им устойчивости (к аналогичным результатам может привести и развитие глубинного диапира). В целом же потеря устойчивости (складчатость) реализуется под совместным действием геостатического и геотектонического давлений и описывается одной из модельных задач в соответствии с геологической обстановкой. Интересные последствия, по-видимому, изложенный механизм вертикального движения имеет в следующей, более реальной ситуации. В верхних частях коры под действием трехосного сжатия (что является причиной образования складчатости как вдоль оси, так и в поперечном направлении геосинклинали) путем потери устойчивости образуются различные формы складчатости. Вследствие высокой подвижности и малой жесткости разуплотненных зон, по сравнению с платформами, складчатость в них более интенсивная и амплитуды искривленности более значительны (что обеспечивает и значительность сокращений оси складчатости в слоистой структуре). Кроме того, по-видимому, в пределах геосинклинальных поясов структура является в некотором смысле близкой к слоистой и по горизонтали. Такая ситуация, с одной стороны, наряду с пластичностью и вязкостью материалов, объясняет причину гибкости слоев геосинклинали, а с другой – причину группирования складчатости по определенным прослойкам. Следует отметить, что в результате потери устойчивости прямолинейной (плоской) формы равновесия, сравнительно жесткий слой переходит к более устойчивой форме равновесия, характеризующейся искривленностью структуры, и часть накопленной энергии затрачивается на этот процесс. Если сравнительно жесткий слой располагается близко к поверхности, то искривленности, вызываемые потерей устойчивости, могут привести к изменениям в рельефе Земли (образуются покровноскладчатые сооружения). Поскольку вновь приобретенная форма является более устойчивой, то первоначально сравнительно жесткий слой становится как бы более жестким при дальнейшем деформировании. Точнее, в процессе дальнейшего деформирования происходит сильное сминание складчатости и с участием смятого первичного сравнительно жесткого и соседних слоев формируется новый жесткий слой. Мощность нового слоя определяется максимумом амплитуды форм потери устойчивости первичного сравнительно жесткого слоя. При образовании первичной складчатости общего сжатия путем потери устойчивости в ее начальной стадии, вертикальные движения, вызываемые поднятиями новообразованных плит или диапиров, являются дополнительными возмущениями для неустойчивости. Этот процесс может повториться несколько раз, и каждый раз на более высоком уровне жесткости и мощности сравнительно жестких слоев и сжимающих нагрузок. Вследствие изменения жесткости основного слоя в одном направлении, двухосности сжатия в горизонтальной плоскости и наличия различной геометрической формы

рассматриваемых слоев, возможно, что направления их максимальной гибкости изменяются, и ось новой складчатости отличается от предыдущих. В результате причудливо переплетаются в различной степени деформированные разномасштабные виды складчатости. Последовательные процессы потери устойчивости (каждый раз решается задача (1)-(3) для вновь образованной структуры, причем возможно, что для различной формы возмущений) прекращаются с исчерпанием возможностей накопления геотектонического давления. Вертикальные движения различного происхождения могут продолжаться и дальше. Но они уже не могут вызвать достаточной величины сжимающей реактивной нагрузки для реализации нового процесса потери устойчивости. В итоге в геосинклиналиях образуются складчатые горные сооружения. При этом формируются различные складки общего сжатия экзогенного происхождения на поверхностных слоях по известным механизмам.

6. Неустойчивый рост плотности вещества недр Земли с глубиной.

В теоретических моделях эволюции Земли, одним из основных разделов исследования связаны с вопросом о распределении плотности геологической среды. Результаты исследований закономерностей приращения плотности вещества недр Земли по глубине, составляет фундамент современного научного представления о ее внутреннем структурном построении. В связи с этим, в многочисленных работах по механике и физике пород, а также в работах по геологии и геофизике [4,14,38-40,71,93,99], на данный вопрос уделено должное внимание. Получены различные экспериментальные и приближенные теоретические зависимости об изменении плотности различных осадочных, метаморфических и магматических пород от изменения глубины, либо давления. В итоге, в обобщенном виде, в структурной геологии принято, что распределения плотности вещества недр Земли имеют вид, показанной на рис.8а. Несмотря на то, что такая зависимость, в принципе, правильно отражает распределения плотности веществ по глубине, оно не охватывает процессы разуплотнения, которые с помощью современных геофизических методов (на верхней коре бурением и сейсморазведкой, в литосфере и мантии - сейсмотомографией и т.д.) уже достоверно установлены.

В [126], получено точное решение полной нелинейной задачи об изменении плотности произвольного состава (нет необходимости предварительного определения закона состояния) вещества в зависимости от изменения деформаций:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{\sqrt{I_3}} - 1,$$

$$I_3 = 1 + 2A_1 + 2(A_1^2 - A_2) + \frac{4}{3}(2A_3 - 3A_2A_1 + A_1^3).$$

$$A_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3; \quad A_2 = \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2; \quad A_3 = \varepsilon_1^3 + \varepsilon_2^3 + \varepsilon_3^3,$$

ε_i - главные значения Тензора деформаций Грина

В случае всесторонней деформации ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$)

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \left(1 + 6\varepsilon + 12\varepsilon^2 + 6\varepsilon^3\right)^{\frac{1}{2}} - 1.$$

Рассмотрены различные неравномерные и всесторонние деформированные состояния (рис. 9). В рамках НТМ показано, что для различных сред эти решения неустойчивы. Это означает, что с ростом величин деформаций процесс уплотнения веществ переходит к процессу разуплотнения. Основываясь на эти теоретические результаты, предложено новое представление о распределении плотности веществ Земли по глубине рис.8б. Отсюда следует, что с ростом глубины (деформаций), сначала происходит приращение плотности. Потом, при достижении определенных значений деформаций (для каждой породы они отличаются, и эти критические значения определяются из решения соответствующих задач *внутренней* неустойчивости), по различным механизмам реализуются процессы разуплотнения. Такой результат является строгим теоретическим доказательством расслоенности внутренних структур Земли и позволяет по новому объяснить многие вопросы, связанные с тектоникой и массопотоком.

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.

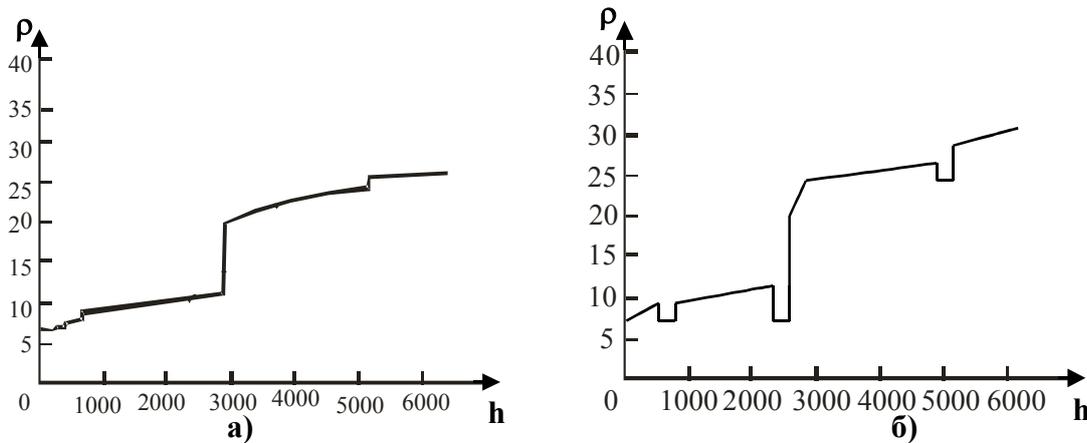


Рис. 8 Схема распределения плотности вещества Земли по глубине: а) классическое представление; б) неклассическое представление

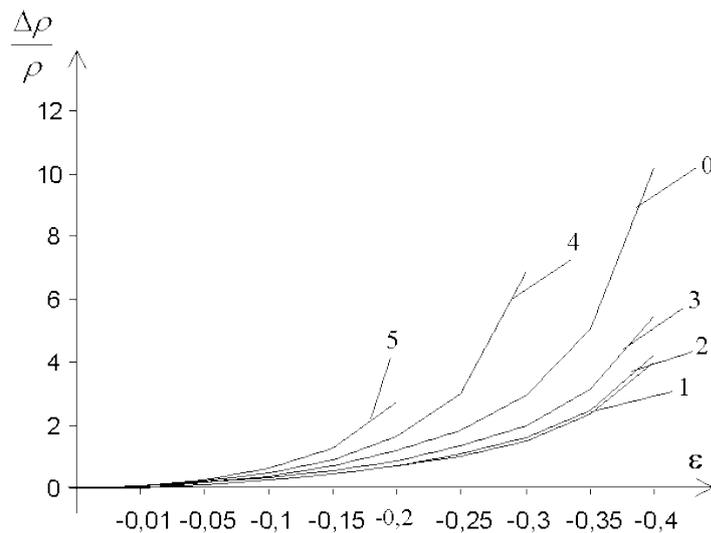


Рис. 9 Графики приращения плотности в случае трехмерного неравномерного деформирования: линия 0 – $\alpha = \beta = \gamma = 1$; линия 1 – $\alpha = \beta = 1, \gamma = 0,01$; линия 2 – $\alpha = \beta = 1, \gamma = 0,1$; линия 3 – $\alpha = \beta = 1, \gamma = 0,5$; линия 4 – $\alpha = \beta = 1, \gamma = 1,5$; линия 5 – $\alpha = \beta = 1, \gamma = 2$; $\varepsilon_1 = \alpha\varepsilon, \varepsilon_2 = \beta\varepsilon, \varepsilon_3 = \gamma\varepsilon$

Выводы

Изложены основные цели и положения выдвинутой автором новой концепции о структурной и тектонической эволюции Земли. Она содержит общефизические принципы реализации любой природы и масштаба движения и основывается на общетеоретической концепции вечного круговорота материи. Согласно концепции, механизмом структурно-тектонической эволюции открытой нелинейной системы Земли является последовательная смена различных разнопериодных устойчивых состояний равновесия.

На основе новой концепции создан НЛП для исследования различных задач геологии и геофизики. Решены многочисленные эталонные модельные задачи и проанализированы их результаты. В частности

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 разломов 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. к ее разжижению. Поскольку образованная таким образом разжиженная масса принимает и передает внешнее воздействие как неконсервативная система, то она сможет геологическое время препятствовать залечиванию 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 (не зависимо от того внутренних или внешних), геометрических и деформационных (которые также имеют разнообразные физико-механические, реологические, термодинамические, химические и т.д. природы) параметров, такие глобальные, региональные и локальные структуры на меридиональных, экваториальных и сферически-концентрических поверхностях должны образоваться 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.

Полученные теоретические результаты конкретных модельных исследований создают серьезную научную базу для новых целенаправленных геологических и геофизических исследований Земных недр и позволяют на современном уровне, обрабатывая и интерпретируя накопленные огромные количества геоинформаций, по новому их осмыслить и познать.

Благодарность. Считаю своим приятным долгом выразить глубокую благодарность академику М.Т. Абасову, член корр. НАНА Р.Д. Джеванширу и проф. Л.А. Буряковскому за многочисленные обсуждения и дискуссии, которые во многом способствовали формированию данного научного направления. Более того, они во многих из этих исследований являлись соавторами и внесли существенный вклад в их разработку. Также выражаю свою благодарность остальным своим соавторам, которые одновременно являются сотрудниками отдела «Тектонофизика и горная механика» Института Геологии Национальной Академии Наук Азербайджана.

Работа выполнена в рамках проекта УНТЦ №3647

Литература

1. Abasov, M.T. et.al., 1992. Theoretical Principles and a Model for Folding by stability Loss. *Geotectonics*, V. 26, no. 3, p. 246-252.
2. Abasov, M.T. et.al., 2000. Модель развития литосферы. *Vestnik Ross. Acad. Nauk*, V. 70, no. 2, p. 129-135.
3. Anderson, D.L., 2002. How many Plates? *Amer. Geophys. Union*, V. 30, no. 5, p. 411-414.
4. Artyushkov, E.V., 1993. *Physical Tectonics (in Russian)*. Nauka. Moscow. 454 pp.
5. Bakulin, V.N. and Protoseniya, A.G., 1982. Nonlinear effects in travel ofn elastic wave Through rocks, *Trans, USSR Akad. Sci, Earth Sci Sect.*, V. 263, p. 314-316.
6. Barka, A. and Reilinge, R., 1997. Active tectonics of the Eastern Mediterranean: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. *Annali di Geofisica. XL*, V. 40, no. 3, p. 587-610.
7. Bayuk, E.I. et.al., 1982. The rock elastic anisotropy under high pressures (in Russian). Nauka. Moscow, 170 pp.
8. Beutler, G. et.al., 1999. "The International GPS Service (IGS). An Interdisciplinary Service in Support of Earth Sciences", *Advances in Space Research*, V. 23, no. 4, p. 631-653.
9. Bhattacharya, A.R., 1987. A 'Ductile Thrust' in the Himalaya. *Tectonophysics*, V. 135, no. 1-3, p. 37-45.
10. Biot, M.A., 1965. *Mechanics of incremental deformations*. New-York: Willey. 504 p
11. Boyer, S.E. and Elliott, D., 1982. Thrust systems. *Bul. Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull.* 66, p. 1196-1230.
12. Calais, E. and Amarjargal, S., 2000. New constraints on current deformation in Asia from continuous GPS measurements at Ulan Baatar, Mongolia, *Geophys. Res. Letters*, V. 27, no. 10, p. 1527-1531.
13. Choi, D.R., 1987. Continental crust under the northwestern Pacific, *Jour. Petroleum Geology*, V. 10, p. 425-440.
14. Clark, S.M., 1969. *Handbook of the Physical Constants of Rock*. [Russian]. Mir. Moscow. p.
15. Coword, M.P. and Ries, F.C., 1986. *Collision tectonics // Eds.*, 19, 415 p.
16. Cserepes, L. et.al., 2000. Effect of the mid-mantle viscosity and phase-transition structure on 3D mantle convection // *Phys. Earth Planetary Int.*, V. 118. p. 125–148.
17. De Mets, C. et.al. 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Lett.* V. 21, p. 2191-2194.
18. De Mets, C. et.al., 2000. GPS geodetic constraints on Caribbean-North America plate motion, *Geophys. Res. Lett.*, V. 27, p. 437-440.
19. Deuss, A. and Woodhouse, J.H., 2001. Seismic observations of splitting of the mid-transition zone discontinuity in the Earth's mantle, *Science*, V. 294, p. 354-357.

20. Dziewonski, A.M., 1984. Mapping the lower mantle: determination of lateral heterogeneity in P velocity up to degree and order 6, *J. Geophys. Res.* 89: p. 5929–5952.
21. Dziewonski, A.M. and Woodhouse, J.H., 1987. Global images of the Earth's interior // *Science*, V. 236. p. 37-48.
22. Ekstrom, G., and Dziewonski, A.M., 1998. The unique anisotropy of the Pacific upper mantle. *Nature*, 394, 9, 168–172.
23. Enderle, U. et.al., 1997. Scales of structure in the lithosphere - images of processes. *Tectonophysics*, V. 275, Issues 1-3, p. 165-198.
24. Feng, R. and Mcevilly, T.V., 1983. Interpretation of seismic reflection profiling data for the structure of San Andreas fault zone. *Bull.Seism.Sos.Am.*, V. 73, p. 1701-1720
25. Forte, A.M. and Mitrovica J.X., 2001. High Viscosity Deep Mantle Flow and Thermochemical Structure Inferred From Seismic and Geodynamic Data, *Nature*, V. 410, p. 1049-1056.
26. Forte, A.M. et.al., 1994. Joint inversions of seismic and geodynamic data for models of three—dimensional mantle heterogeneity, *J. Geophys. Res.*, 99(B11), p. 21857–21877.
27. Fukao, Y. et.al., 1992. Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone // *J. Geophys. Res.* V. 97, no. B4, p. 4809-4822.
28. Fukao, Y. et.al., 1994. Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography // *Jour. Geol. Soc. Japan.* V. 100, no. 1, p. 4-23.
29. Gent, G. et al., 1997. GFZ Analysis Center of IGS – Annual Report // *Inter. GPS Service for Geodynamics. 1996 Annual Rep.* Pasadena: IGS Central Bureau, p. 169-181.
30. Goleby, B.R. et.al., 1989. Geophysical evidence for 'thick-skinned' crustal deformation in central Australia. *Nature*, V. 337, p. 325-330.
31. Grand, S.P. et.al., 1997. Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth, *GSA Today*, V. 7, no. 4, p. 1-7.
32. Gu, Y.J. et.al., 1998. Global de-correlation of the topography of transition zone discontinuities, *Earth Planet. Sci. Lett.*, V. 157, no. 1-2, p. 57-67,
33. Guz, A.N., 1986. Elastic waves in bodies with elementary pressures (in Russian). *Naukova Dumka. Kiev.* V. 1, 376 p., V. 2, 536 p.
34. Hamilton, W., 2001. The closed upper-mantle circulation of plate tectonics // *Plate boundary zones. Geodynamic series.* Amer. Geophys. Union, p. 359-410.
35. Heitzmann, P., 1987. Calcite mylonites in the Central Alpine "root zone". *Tectonophysics*, V. 135, no. 2, p. 207-215.
36. Hilst, R.D., 2004. GEOPHYSICS: Changing Views on Earth's Deep Mantle. *Science*, V. 306, no. 5697, p. 817-818
37. Jaeger, H.M. and Nagel, S.R., 1992. "La physique de l'état granulaire". *La Recherche*, V. 249, no. 23, p. 1380-1387
38. Jarkov, V.N., 1983. The Earth Inner structure (in Russian). *Nauka. Moscow.* 416 p.
39. Johnston, D.H. et.al., 1979. Attenuation of seismic waves in dry abd saturated rocks: II. Mechanisms, *Geophysics*, V. 44, no.4, pp. 691-711.

40. Kalinin, V.A., 2000. Properties of geomaterials and physics of the Earth. The elected works, AIPE RAN. Moscow. 334 p.
41. Kellog, L.H. et.al., 1999. Compositional stratification in the deep mantle. *Science*, V. 283, p. 1881–1884.
42. Kennett, B.L.N. et.al., 1998. Joint seismic tomography for bulk sound and shear wave speed in the Earth's mantle. *J. Geophys. Res.* 103:12, p. 469–93
43. Kido, M. and Yuen, D.A., 2000. The role played by a low viscosity zone under a 660 km discontinuity in regional mantle layering. *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 181, no. 4, p. 573–583.
44. Korchagin, F. and Gerasimenko, M., 1999. Velocity field of around the sea Okhotsk and Sea of Japan region determined from a new continuous GPS network, *Geophys. Res. Lett.*, V. 26, no. 16, p. 2533-2536.
45. Kuliev, G.G., 1998a. To a Dynamic Method of Poisson's Coefficient Determination. Extended volume 1 abstracts, 60th EAGE Conference and Technical Exhibition, 8-12 June, Leipzig, German., P081.
46. Kuliev, G.G., 1998b. Non-classic theoretical base model of modified 3D seismic technologies. *Geophysics news in Azerbaijan, Bulletin*, no. 1, p.5-6.
47. Kuliev, G.G., 1998c. To physical-mechanical properties of strained slightly anisotropic media. *Proceedings the sciences of Earth of Academy Sciences Azerbaijan*, no. 4, p. 134-140.
48. Kuliev, G.G. and Jabbarov, M.D., 1998. To elastic waves propagation in strained nonlinear anisotropic media. *Proceedings of Azerbaijan National Academy of Sciences. The Sciences of Earth*, no. 2, p. 103-112.
49. Kuliev, G.G. and Djevanshir, R.D., 2000. On real and virtual values of rock's elasticity modulus. Abstracts 31st Intern. Geological Congress, 2000, 4-17 august, Rio de Janeiro, Brazil.
50. Kuliev, G.G. et.al., 1991. Folding with Multiple Harmonics in a Model of the Instability of a System Under Deformation. *Transaction of the USSR Academy of Sciences. Earth science section*, V. 320, no. 7, p. 106-109.
51. Kuliev, G.G. et.al., 1996a. Mechanism of Lithosphere Structure Delimitation Formation. Abstract, 30th Intern. Geolog. Congress, Beijing, China, no. 2, p. 257.
52. Kuliev, G.G. et.al., 1996b. Shear Failure (Fracture) in Stratified Geological Structures. *Transaction of the USSR Academy of Sciences. Earth Science section*, V. 343, no. 5, p. 71.
53. Kuliev, G.G. et.al., 1998. Folding caused by inner stresses effect in sedimentary basins. *Proceedings sciences of Earth of academy sciences Azerbaijan*, no. 4, p. 97-103.
54. Kumazawa, M. and Maruyama, S., 1994. Whole earth tectonics. *Jour. Geol. Soc. Japan*, V. 100, no. 1, p. 81-102.
55. Lister, J.R. and Buffet, B.A., 1998. Stratification of the outer core at the core-mantle boundary. *Physics Earth Planet. Interiors*, V. 105, p. 5-19.
56. Lobkovskiy, L.I. et.al., 2004. Current problems of geotectonics and geodynamics [in Russian]. *Scientific World*, Moscow, Nauchniy mir, 612 p.
57. Loper, D.E. and Lay, T., 1995. The Core-Mantle Boundary Region, *J. Geophysical Research*, V. 100, no. B4, p. 6397-6420.

58. Magnitskiy, V.A., 1965. The Earth inner structure and physics (in Russian). Nedra. Moscow, 390 p.
59. Maruyama Sh., 1994. Plume tectonics. *Journal Geol. Soc. Japan*, V. 100, no. 1, p. 24–49.
60. Montagner, J.P. and Tanimoto, T., 1991. Global upper mantle tomography of seismic velocities and anisotropies. *J. Geophys. Res.*, V. 96, no. B12, p. 20337-20351.
61. Montelli, R. et.al., 2004. Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle. *Science*, V. 303, no. 5656, p. 338-343.
62. Morgan, W.J. and Morgan, J.P., 1999. Two-stage melting and the geochemical evolution of the mantle: A recipe for mantle plum pudding. *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 170, p. 215-239.
63. Navrotsky, A., 1994. *Physics and chemistry of Earth materials*. Cambridge University press. 413 p.
64. Olsen, K.H. et.al., 1995. *Continental rifts: evolution, structure, tectonics*. Elsevier. Amsterdam, p. 61-92
65. Oral, M.B. et.al., 1991. GPS measurements and finite element modeling of present-day tectonic deformations in the Eastern Mediterranean (abstract), AGU Chapman Conference, Time Dependent Positioning: Modeling Crustal Deformation, 23-25 Sept. Annapolis MD.
66. Physical properties of the mineral system of the Earth's interior / International monograph Project 3CAPG.Praha. 1985. CSAS Publ.Geophys.Inst.
67. Polet, J. and Anderson, D.L., 1995. Depth extent of cratons as inferred from tomographic studies. *Geology*, V. 23, no. 3, p. 205-208.
68. Reilinger, R.E. et.al., 2000. Coseismic and Postseismic Fault Slip for the 17 August 1999, M = 7.5, Izmit, Turkey Earthquake. *Science*, V. 289, no. 5484, p. 1519-1524
69. Resovsky, J.S. and Ritzwoller, M.H., 1999. A degree 8 mantle shear velocity model from normal mode observations below 3 mHz, *J. Geophys. Res.*, V. 104, no. B1, p. 993-1014.
70. Reston, T.J., 1988. Evidence for shear zones in the lower crust offshore Britain. *TECTONICS*, V. 7, no. 5, p. 929-945.
71. Ringvud, A.E., 1982. *The origin of the Earth and the Moon* (in Russian). Nedra. Moscow. 293 p.
72. Ritsema, J. and Van Heijst, H.J. 2000. New seismic model of the upper mantle beneath Africa. *Geology*, V. 28, no. 1, p. 63-66,
73. Rothacher, M. et.al., 1997. Annual report 1996 of the CODE Analysis Center of the IGS, International GPS Service for Geodynamics : 1996 annual report, p. 201-219, Pasadena, 1997.
74. Sandwell, D.T. and Smith, W.H.F., 1997. Marine gravity anomaly from Geosat and ERS-1 satellite altimetry. *J. Geophys. Res.* V. 102, no. 10, p. 039-10054.
75. Shearer, P.M. and Flanagan, M.P., 1999. Seismic velocity and density jumps across the 410- and 660-kilometer discontinuities, *Science*, V. 285, p. 1545-1548,

76. Singh, S.C. and Mckenzie, D., 1993. Layering in the lower crust: *Geophysical Journal International*, V. 113, p. 622–628.
77. Su, W.-J. et.al., 1994. Degree 12 model of shear velocity heterogeneity in the mantle, *Journ. of Geophys. Res.*, V. 99. no. B4, p. 6945-6980.
78. Takahashi, H. et.al., 1999. Velovity field of around the Sea of Okhotsk and Sea of Japan regions determined from a new continuous GPS network data, *Geophys. Res.Letters*, V. 26, p. 2533-2536
79. Tracy, R.D., 1987. Metamorphyc geology. US national report of International Union of Geodesy and Geophysics, 1983-1986 // *Rev. Geophys.*, V. 25, no. 5, p. 1115-1122.
80. Trampert, J. et.al., 2004. Probabilistic tomography maps chemical heterogeneities throughout the lower mantle. *Science*, V. 306, no. 5697, p. 853-856.
81. Van Der Hilst, R.D. and Korason, H., 1999. Compositional heterogeneity in the bottom 1000 kilometers of Earth's mantle: toward a hybrid convection model. *Science*, V. 283, no. 5409, p. 1885-1888.
82. Vasco, D.W. and Johnson, L.R., 1998. Whole Earth structure estimated from seismic arrival times // *J. Geophys. Res.* V. 103, no. 132, p. 2633–2671.
83. Vinnik, L. et.al., 1998. Broad-band converted phases from midmantle discontinuities, *Earth, Planets and Space (OHP special issue)*, V. 50, p. 987-997.
84. White, S.H. and Bretan, P.G., 1985. Rheological Controls on the Geometry of Deep Faults and the Tectonic Delamination of the Continental Crust. *Tectonics*, V. 4, no. 3, p. 303-309
85. Widiyantoro, S. et.al., 1998. Extending shear-wave tomography for the lower mantle using S and SKS arrival-time data, *Earth, Planets, and Space* V. 50, p. 999-1012.
86. Widiyantoro, S. et.al., 2000. Improving global shearwave travel-time tomography using three dimensional ray tracing and iterative inversion, *Geophys. J. Int.*, V. 141, p. 747-758.
87. Williams, O. and Revenaugh, J., 2005. Anciant subduction, mantle eclogite, and the 300 km seismic discontinuity // *Geology*. V. 33, no. 1, p. 1–4.
88. Yin, H. and Rasolofosaon, P.N.J., 1994. Nonlinear and linear elastic behavior of anisotropic rocks: Ultrasonic experiments versus theoretical predictions. 64 SEG meeting Los Angeles, Expanded Abstracts, V. 3, no. 4, p. 1129-1132.
89. Zhang, Y.-S. and Tanimoto, T., 1993, High resolution global upper mantle structure and plate tectonics: *J. Geophys. Res.*, V. 98, p. 9793-9823.
90. Quliyev, H.H., 2003. Алямдян, Каинатдан зялзяляйя гядяр. Бакы, Елм, 140 с.
91. Александров, Г.Т. и др., 2001. Метод определения нелинейных упругих свойств горных пород. Доклады Росс. Акад. Наук, Т. 380, № 1, с. 109.
92. Алешин, А.С. и Галаганов, О.Н., 2001. Методика и техника спутниковой геодезии для целей деформационного мониторинга. Геоэкология, № 1, с. 83-.
93. Альтшулер, Л.В. и др., 2004. Начало физики мегабарных давлений. Вестник Российской Академии Наук, Т. 74, №11, с. 1011-1022.

94. Афанасьев, С.Л., 1978. Классификация циклов геологических процессов // сб. трудов ВЗПИ. М. с. 133-170.
95. Баренбаум, А.А., 2002. Галактика, Солнечная система, Земля. Соподчиненные процессы и эволюции.-М.: ГЕОС, 612 с.
96. Баренбаум, А.А., 2007. Нефтегазоносность недр: эндогенные и экзогенные факторы. Автореферат диссер. на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. М.: 46 с.
97. Белов, А.А. и др., 1990. Тектоническая расслоенность литосферы и региональные геологические исследования. Наука. Москва. 273 с.
98. Бембель, Р.М. и др., 2001. Геосолитонная природа субвертикальных зон деструкции. Геофизика, Спец. Выпуск к 50-ти летию «Хантымансийскгеофизика», №6, с. 36-50
99. Буллен, К.Е., 1978. Плотность Земли. М.: Мир, 442 с.
100. Гантмахер, Ф.Р. Лекции по аналитической механике. М.: Из-во «Наука»; 1966, с. 300.
101. Гарагаш, И.А. и др., 1986. Сверхпластическое течение материала внутри разлома Изв. АН СССР, Физика Земли, №2, с. 12-24.
102. Георгобиани, Т.В. и Закарая, Д.П., 2007. О механизмах образования листрических разломов. Фундаментальные проблемы геотектоники. Материалы XL Тектонического совещания., Москва, ГЕОС. Т. 1, с. 178-181.
103. Голдин, С.В., 2002. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физическая мезомеханика, Т. 5, №5, с. 5-22.
104. Гончаров, М.А., 1999. О тектонике литосферных плит – к геодинамике иерархических соподчиненных геосфер. // Отечественная геология, №3, с. 10-14.
105. Гордеев, Е.И. и др., 2001. Предварительный анализ перемещений станций GPS на Камчатке: скорости плит и геодезический предвестник землетрясения. // Геодинамика и вулканизм Курило-камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский. с. 82-94.
106. Гузь, А.Н., 1989. Механика разрушения композитных материалов при сжатии. Наукова Думка. Киев. 632 с.
107. Дмитриевский, А.Н., 2004. Фундаментальные проблемы геологии нефти и газа. Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, №12, с. 4-8.
108. Добрецов, Н.Л. и Хлестов, В.В., 1978. Метаморфизм и его связь с другими геологическими явлениями. Тектоносфера Земли. Наука. Москва, 286 с.
109. Добрецов, Н.Л. и др., 2001. Глубинная геодинамика. СО РАН. Фил. ГЕО. Новосибирск, 409 с.
110. Егоркин, А.В., 1999. Изучение мантии на сверхдлинных геотраверсах. Физика Земли, №7-8, с. 114-130.
111. Жарков, В.Н. и Трубицин, В.П., 1980. Физика планетных недр. Наука. Москва. 448 с.

112. Калинин, В.А. и др., 1989. Связь микроструктурных превращений в горных породах с сейсмотектоническими процессами. В кн. «Свойства геоматериалов и физики Земли». Избранные труды – Москва: ОИФЗ РАН – 2000, с. 269-275.
113. Калинин, В.А. и др., 1991. Свойства веществ в процессе твердотельных превращений и их связь с тектоническими явлениями. В кн. «Свойства геоматериалов и физики Земли». Избранные труды – Москва: ОИФЗ РАН – 2000, с. 289-291
114. Короновский, Н.В. и Ломизе, М.Г., 2001. Концепция голубиных разломов и тектоники. с. 344-373. В кн. Фундаментальные проблемы общей тектоники. Научный мир. Москва, 519 с.
115. Краснопевцева, Г.В., 1987. Низкосортные слои (волноводы) в земной коре // Глубинное строение слабосейсмичных регионов. СССР. Москва. Наука. с. 238
116. Кулиев, Г.Г., 1987. Устойчивость стержней при неравномерном сжатии мертвыми и следящими нагрузками, Изв. АН Аз. ССР, Сер. физ.-техн. и мат. наук, №5, с. 43-45
117. Кулиев, Г.Г., 1988. Основы математической теории устойчивости скважин. Баку, Элм, 172 с.
118. Кулиев, Г.Г., 2000. Определение коэффициента Пуассона в напряженных средах. Докл. Росс. Акад. Наук, Т. 370, №4, с. 534-537.
119. Кулиев, Г.Г., 2001. Общие физические принципы геодинамического развития. Известия НАНА, Науки о Земле, №1, с. 6-13.
120. Кулиев, Г.Г., 2002. Вечный круговорот материи. Из-ва «Элм». Баку. 132с
121. Кулиев, Г.Г., 2005а. Основы неклассической линеаризованной теории деформаций в геодинамике. Известия НАНА, Науки о Земле, №1, с. 21-34.
122. Кулиев, Г.Г., 2005б. Неклассическая линеаризованная теория деформаций в геофизике. Известия НАНА, Науки о Земле, №2, с. 41-51.
123. Кулиев, Г.Г., 2008. О внутреннем строении Земли в рамках неклассического линеаризованного подхода. Известия НАНА, Науки о Земле, №1, с. 18-31.
124. Кулиев, Г.Г. и Джаббаров, М.Д., 2000. Об амплитудных характеристиках упругих волн в напряженных средах. Докл. Росс. Акад. Наук, Т. 370, №5, с. 672-674.
125. Кулиев, Г.Г. и Касимова, С.М., 2000. Геодинамические механизмы образования и тектонического развития осадочных бассейнов, “Геолог Азербайджана”, №4, с. 52-62.
126. Кулиев, Г.Г. и Аскеров, А.Д., 2007. Решение нелинейной задачи о приращении плотности среды глубин Земли и его неустойчивость. Известия НАНА, Науки о Земле, №1, с. 38-50.
127. Кулиев, Г.Г. и др., 1989. Об одном общем механизме формирования складчатости. Докл. Акад. Наук СССР, Т. 305, №4, с. 926-929.
128. Кулиев, Г.Г. и др., 1995. Разломы на латеральных (горизонтальных) поверхностях земных недр. Докл. Росс. Акад. Наук, Т. 340, №1, с. 78-79.

129. Кулиев, Г.Г. и др., 1995. Механизм разрушения расслаиванием в слоистых структурах Земли. Докл. РАН, Т. 340, №2, с. 222-224
130. Кусков, О.Л., Галимзянов, Р.Ф. и Хитаров, Н.И., 1983. Фазовые соотношения в системе Mg – Fe – Cu – Al₂O₃ – SiO₂ в переходной зоне мантии // Докл.АН СССР., Т. 270, №3, с.
131. Левин, В.Е. и др., 2002. Предварительные результаты GPS мониторинга на Камчатке и Командорских островах. // Вулканология и Сейсмология, №2, с. 3-.
132. Леонов, М.Г., 2001. Тектоника континентального фундамента и вертикальная аккреция консолидированной Земной коры. с. 91-154. В кн. Фундаментальные проблемы общей тектоники. Научный мир. Москва, 519 с.
133. Леонов, Ю.Г., 2001. Континентальный рифтогенез: современные представления, проблемы и решения. с. 155-173. В кн. Фундаментальные проблемы общей тектоники. Научный мир. Москва, 519 с.
134. Лобковский, Л.И. и др., 2004. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 612 с.
135. Лукьянов, А.В., 1991. Пластические деформации и тектоническое течение в Литосфере. Наука. Москва. 225 с.
136. Лукьянов, А.В., 1999. Нелинейные эффекты в моделях структурообразования. Проблемы геодинамики Литосферы., Тр. ГИН РАН: Наука, Москва, с. 253-287.
137. Мамедов, П.З. и Гулиев, И.С., 2003. Субвертикальные геологические тела в осадочном чехле Южно-Каспийской впадины. Изв. НАН Азербайджана, Науки о Земле, 3, 139-146.
138. Мейсон, Р., 1981. Петрология метаморфических пород. Мир. Москва. 263 с.
139. Меланхолина, Е.Н. и др., 2001. Развитие глубинных ап- и даунвеллингов и геодинамика Земли // Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный Мир, с. 3180-343.
140. Миллер, Ю.В., 1988. Структура архейских зеленокаменных поясов. Наук. Ленинград, 143 с.
141. Николаев, А.В. и Санина, И.А., 1982. Метод и результаты сейсмического просвечивания литосферы Тянь-Шаня и Памира. ДАН СССР, Т. 264, №1, с. 69-72.
142. Николаевский, В.Н., 2006. Трещиноватость земной коры как ее генетический признак // Геология и Геофизика, Т. 47, №5, с. 646-656.
143. Павленкова, Г.А., 2003. Скоростная неоднородность верхней мантии Восточной Европы. // Геофизика XXI столетия: 2002. Научный мир. Москва.
144. Павленкова, Н.И., 1998. Сейсмические модели земной коры и верхней мантии и их геологическая интерпретация // Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты. М.: ГЕОС, Т. 2, с. 72-75.
145. Павленкова, Н.И., 2007. Вращение оболочек Земли как причины глобального тектоногенеза. Фундаментальные проблемы геотектоники.

- Материалы XL Тектонического совещания. Т. 2, Москва, ГЕОС, с. 70-73.
146. Паталаха, Е.И. и др., 1990. Природа и эволюция листрических разломов. Геотектоника, №4, с. 24.
 147. Паталаха Е.И. и др., 1995. Тектонические потоки как основа понимания геологических структур. Нац. АН Украины. Киев. 159 с.
 148. Пейве, А.В., 1980. Глубинные разломы // Тектоника в исследованиях Геологического института АН СССР. Наука. Москва, с. 95-122.
 149. Пейве, А.А. и Пушаровский, Ю.М., 1982. Теоретические проблемы геологии океанов. // Природа, №1.
 150. Петрофизика: Справочник в трех книгах. Книга третья. Земная кора и мантия. Под ред. Н.Б. Дортман. 1992. Недра. Москва. 286 с.
 151. Пуарье, Ж.-П., 1988. Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах. М.: Мир, 287 с.
 152. Пушаровский, Ю.М., 1998. Сейсмотомография, тектоника и глубинная геодинамика // Докл. РАН, Т. 360, №4, с. 518-522.
 153. Пушаровский, Ю.М., 2001а. Тектонические феномены океанов, с. 174-230. В кн. Фундаментальные проблемы общей тектоники. Научный мир. Москва, 520 с.
 154. Пушаровский, Ю.М., 2001б. Тектоника и геодинамика мантии Земли, с. 10-33. В кн. Фундаментальные проблемы общей тектоники. Научный мир. Москва. с. 520.
 155. Пушаровский, Ю.М., 2004. Движущие континенты. Геотектоника, №3, с. 3-12.
 156. Пушаровский, Ю.М., 2005. Строение, энергетика и тектоника мантии Земли // Вестник РАН, Т. 75, № 12, с. 1115–1122.
 157. Пушаровский, Ю.М. и Пушаровский, Д.Ю., 1999. Геосферы мантии Земли. Геотектоника, №1, с. 3-14.
 158. Пушаровский, Ю.М. и Пушаровский, Д.Ю., 2008. Проблемы строения и геологическая история геосфер мантии Земли. с.134-135. Общие региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы ХLI тектонического совещания. М.: ГЕОС, Т. 2, 538 с.
 159. Пушаровский, Ю.М. и Соколов, С.Д., 2001. Нелинейная тектоника // Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный мир, с. 476-508.
 160. Рингвуд, А.Е., 1981. Состав и петрология мантии Земли. Недра. Москва. 584 с.
 161. Руженцев, С.В. и Соколов, С.Д., 1985. Тектонические покровы и движения литосферных плит // Проблемы движений и структурообразования в коре верхней мантии. М.: Наука, с. 30-41.
 162. Русинов, В.Л., 2005. Зоны сдвиговых деформаций в литосфере и их роль в эндогенной активности Земли // Геотектоника, №3, с. 66-79.
 163. Соколовский, А.К. и др., 2007. О некоторых проблемах современной тектоники. // Известия высших заведений, №6, с. 13-22.

164. Сорохтин, О.Г. и Ушаков, С.А., 1991. Глобальная эволюция Земли. МГУ. Москва. 446 с.
165. Сорохтин, О.Г. и Ушаков, С.А. 2002. Развитие Земли. Изд-во МГУ. Москва. 374 с.
166. Суворов, А.И., 2001. Тектоническая расслоенность и тектонические движения континентальной литосферы. с. 34-48. В кн. «Фундаментальные проблемы общей тектоники». Научный мир. Москва. 520 с.
167. Талицкий, В.Г., 1994. Новые подходы к моделированию геологической среды // Геотектоника, №6, с. 78-84.
168. Трифонов, В.Г., 1982. Признаки тектонической расслоенности литосферы. Тектоническая расслоенность литосферы новейших подвижных поясов. Наука. Москва, с. 66-75.
169. Трифонов, В.Г., 1983. Позднотретичный тектогенез. Наука. Москва. 227с.
170. Трифонов, В.Г., 1999. Неотектоника Евразии. Scientific World. Moscow. 252 с.
171. Трифонов, В.Г. и Певнев, А.К., 2001. Современные движения земной коры по данным космической геодезии // Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный мир, с. 374–401.
172. Трубицын, В.П. и Рыков, В.В., 2000. Мантийная конвекция с плавающими континентами. // Проблемы глобальной геодинамики. Москва: ГЕОС, с. 7-28.
173. Фундаментальные проблемы общей тектоники. 2001. Научный мир. Москва. 520 с.
174. Хаин, В.Е., 2000. Тектоника континентов и океанов. Научный мир. 604 с.
175. Хаин, В.Е., 2003. Земля - уникальная планета Солнечной системы. Вестник Российской академии наук, Т. 73, №9, с. 822-829.
176. Хаин, В.Е., 2008. Динамика и эволюция планеты Земля – внутренние и внешние источники энергии. с. 388-393. Общие региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы ХLI тектонического совещания. М.: ГЕОС, Т. 2, 538 с.
177. Хаин, В.Е. и Ломизе, М.Г., 1995. Геотектоника с основами геодинамики. Изд. МГУ. Москва. 480 с.
178. Шевченко, В.И. и др., 1999. Современная геодинамика Кавказа (по результатам GPS измерений и сейсмологическим данным) // Физика Земли, №9, с. 3-18.
179. Шишкин, Е.И. и Шишкина, Т.Ю., 1989. Геотектоника, №6, с. 72.
180. Щукин, В.К., 1982. Волноводы, расслоенность литосферы и горизонтальные сейсмофокальные зоны. Тектоническая расслоенность литосферы подвижных поясов. Наука. Москва, с. 79-82.
181. Kuliev, G.G., 2001b. New conception of theoretical model of universe and general physical principle of its eternal evolution. Proceedings. The Science of Earth, no. 2, p. 115-119.

182. Heidbach, O. et.al., 2008. The World Stress Map database release 2008 doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008.
183. Reilinger, R. et.al., 2006. GPS Constraints on Continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia Continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, journal of geophysical research, vol. 111, B05411, doi:10.1029/2005JB004051.
184. Сергин, С.Я., 2008. Системная организация процессов геологического развития страны. Белгород, Изд-во БелГУ, 360 с.