

жении гайотов), их групп, так и протяженных горных цепей с их характерным делением по простиранию на обособленные друг от друга горные массивы с предгорными опусканиями — это Императорские горы и Гавайи в Тихом океане, Мальдивский хребет в Индийском.

В переходной зоне от континента к океану господствуют два механизма новейшего Г. Во-первых, это гигантские поднятия островных дуг над зонами субдукции океанской коры, где горы, частью надводные, формируются благодаря комплексу процессов: дифференцированных тектонических воздыманий, наращивания объемов за счет тектонической аккре-

ции океанских осадков, увенчивания поднятий вулканическими постройками (рис. 5). В окраинных морях, впадины которых образуются за счет задугового рифтогенеза, тектоническое крошение и растяжение континентальной земной коры обуславливают формирование остаточных глыбовых поднятий и впадин, ансамбли которых подобны континентальным бордерлендам. Примером служит подводная возвышенность Ямато в Японском море, континентальные бордерленды Южно-Китайского и Тирренского морей.

*Г. Ф. Уфимцев*

**ТЕКТОНОФИЗИКА (Т.)** (англ. — tectonophysics) — часть геотектоники, посвященная изучению физики тектонических процессов на основе совместного применения физических и геологических методов.

**Основная задача Т.** — исследование генезиса или механизма формирования природных тектонических структур (механизма деформирования геобъектов) и связанных с ним физических полей (напряжений, деформаций, смещений, разрушения) при различных масштабах рассмотрения, от слоев и складок до литосферы в целом. Механизм деформирования участка геосреды — комплекс закономерностей, описывающих процесс деформирования. Для его изучения необходимо, во-первых, исследовать три группы характеристик: 1) способ нагружения геобъекта — внешние (поверхностные) и внутренние (объемные) силы, его форму и движения поверхности (граничные условия); 2) физические свойства вещества геобъекта и его строение; 3) возникающие в геобъекте новые деформации, разрывы и напряжения. Во-вторых, необходимо установить связи между этими группами характеристик [1, 2]. Основными методами исследований в Т. являются методы экспериментальной и теоретической механики, структурной геологии, адаптированные к решению задач Т., а также специальные методы Т.

**Главные разделы Т.** — ее физические основы, общая Т. (физическая теория тектонических процессов) и прикладная Т. [1, 2].

**I. Физические основы Т.:** 1. Изучение физико-механических свойств горных пород — образцов и участков массива (процессов деформирования, характеристик упругости, вязкости, ползучести и прочности). 2. Методы регистрации и изучение деформаций, напряжений, разрывов в земной коре и верхней мантии. 3. Принципы и методы физического и математического моделирования (теория подобия; изучение деформаций, напряжений, разрывов и т. д. в моделях; свойств эквивалентных материалов; основы механики континуума и механики композитов, геомеханики, макро- и микрореологии неоднородных сред; аналитические и численные методы математического моделирования).

**II. Физическая теория тектонических процессов (общая Т.):** 1. Экспериментальная Т. (физическое

моделирование напряжений, деформаций, образования структур на моделях из непрозрачных, а также из оптически активных материалов). 2. Теоретическая Т. (математическое моделирование напряжений и деформаций, образования структур путем решения прямых задач механики континуума и механики разрушения). 3. Полевая Т. (изучение деформаций, напряжений, разрывов, складок и др. структур разных уровней методами структурной и инженерной геологии, сейсмологии, полевой и спутниковой геодезии и т. д., а также специальными методами Т.). 4. Изучение и интерпретация характеристик тектонических движений (по данным о вертикальных и горизонтальных движениях земной поверхности, GPS-наблюдений и полевой геодезии, структурной геологии). 5. Изучение механизмов деформирования геосреды (изучение типичных механизмов формирования структур методами Т. моделирования; реконструкция природных механизмов деформирования участков тектоносферы на базе синтеза данных разных методов).

**III. Прикладная Т.** — специализированные Т. исследования, способные помочь при изучении подкорковых процессов, причин тектонических движений; причин образования разных магм; при сейсмораионировании, прогнозе сейсмичности; поиске, разведке, разработке месторождений полезных ископаемых.

**Развитие Т.** включает три этапа. Первый этап (XIX в. и 1-я пол. XX в.). До конца 20-х годов XX в., пока в геотектонике была принята контракционная гипотеза, а затем гипотеза о горизонтальных перемещениях материков, основными в Т. были вопросы образования складок и связанных с ними разрывов при действии горизонтальных сил. Складки воспроизводились на моделях без учета требований подобия (А. Фавр, А. Добрэ, Б. Виллис, Т. Линк, Г. Клоос, В. Ридель и др.). В 30–40-е годы, когда ведущими в процессах тектогенеза многие считали вертикальные силы, складкообразование объяснялось гравитационным всплыванием или оползанием, вертикальным раздавливанием слоев. Расширились полевые исследования складок и разрывов, делались попытки восстановить условия их образования (А. А. Белицкий, В. В. Белоусов,

В. В. Бронгулеев, В. Н. Данилович, М. В. Муратов, А. В. Пэк, А. А. Сорский, И. В. Кириллова и мн. др.), было начато моделирование складок с учетом теории подобия и качественное моделирование разрывов, трещин, кливажа (Л. Неттлетон, М. Добрин, В. В. Белоусов, А. А. Белицкий, Е. Н. Пермяков, И. В. Кириллова и др.).

*Второй и третий этапы* (50–60-е и 70–90-е годы XX в.) — этапы становления современной Т. и ее развития. Тектонофизические исследования в СССР были организованы В. В. Белоусовым. В 1944 г. в отделе геотектоники Института теоретической геофизики (ныне ОИФЗ РАН) он создает лабораторию экспериментальной тектоники. В 1944–1950 гг. под его руководством выполнен цикл работ с целью изучения механизма складкообразования на примере мелких складок и начато моделирование складок. Создание современной Т. как научной дисциплины состоялось в 50–60-е годы XX в. и определялось в первую очередь работами М. В. Гзовского и Г. Рамберга.

*Создание основ общей и прикладной Т.* включало проведенную М. В. Гзовским [1, 2] в 1950–1975 гг. разработку физических основ Т., учения о тектонических полях напряжений, физической теории образования тектонических разрывов, двух новых типов классификации складок и разрывов, учения о механизмах деформирования участков геосреды, методов определения характеристик тектонических движений, выполненное им, структурно-геологическое и тектонофизическое исследование Байджансайского антиклинория, а также построение карт ряда тектонофизических характеристик для территории СССР и ее областей (градиентов скорости новейших движений и т. д.) и исследования по применению Т. при сейсмрайонировании и оценке сейсмической опасности. В итоге был создан комплекс методов изучения динамики и кинематики участков земной коры, механизмов их деформирования и энергии тектонических процессов, показаны перспективы применения Т. при решении ряда задач геотектоники и геофизики. Результаты изложены в монографиях [1, 2, 10]. Гзовский ввел в геологию и тектонику новую методологию — количественные исследования геологических объектов с позиций механики.

Г. Рамберг с конца 50-х годов исследовал процессы гравитационной тектоники и разработал основы их моделирования. Изучал на физических моделях формирование всплывающих структур (от соляных куполов до срединно-океанских хребтов), образование складчатости в них и в чехле. Получил решение ряда задач о формировании складок, напряжениях и деформациях в слое и в многослойной толще в поле силы тяжести. Его монографии «Моделирование деформаций земной коры с применением центрифуги» (1970), [7] и др. работы (Ramberg, 1961–1985) стали базисными в области изучения гравитационных структур.

В 1964 г., после выхода большого числа работ по тектонофизической тематике создается журнал «Tectonophysics».

Развитие тектонофизических исследований в нашей стране и за рубежом в 1950–2003 гг. имело различный характер: у нас оно было концентрированным (в ряде научных центров), за рубежом — «дисперсным» (исследования велись отдельными авторами в различных областях). В нашей стране такие исследования проводились коллективами в лабораториях Т. или экспериментальной тектоники, созданных в 50–70-е годы М. В. Гзовским, В. В. Белоусовым, И. В. Лучицким, В. Г. Гутерманом, В. А. Королевым и Ш. Д. Фатхуллаевым, А. В. Лукьяновым, Е. И. Паталахой, С. И. Шерманом. В области Т. работали также П. Н. Николаев, А. И. Шеменда, А. К. Худолей, А. Н. Бокун, В. А. Корчемагин, Т. В. Гиоргобиани и мн. др. С 1982 г. работы по Т. координирует секция экспериментальной тектоники и структурной геологии МТК РАН, созданная И. В. Лучицким. К зарубежным центрам тектонофизического профиля относятся лаборатории Г. Рамберга, П. Попова и С. Стоянова, Ж. Анжелль, Дж. Диксона, Ма Цзинь, работавшие с 60–70-х годов и возникшие в последние 15–20 лет подразделения Р. Симпсона, Ф. Карне, С. Пасчира и мн. др.

В последние десятилетия в Т. активно развивались исследования *натурных полей напряжений* по механизмам очагов землетрясений или по трещинам во многих районах и разработка *методов их восстановления*, а также исследования *натурных полей деформаций* и разработка *методик стрейн-анализа*. С применением физического и математического моделирования и привлечением натуральных данных изучались *процессы формирования тектонических структур разного масштаба и генезиса*, обусловленные ими *поля напряжений и деформаций*, а также *процессы складкообразования*.

Далее изложены основные направления и результаты исследований в области Т.

**Физическое моделирование** по типу решаемой задачи разделяется на моделирование: 1) процессов образования тектонических структур и полей деформаций при обычной или увеличенной силе тяжести на моделях из непрозрачных материалов; 2) тектонических полей напряжений на моделях из оптически активных материалов. В зависимости от соотношения свойств материала модели и геомассива выделяют два вида моделирования: неэквивалентное и эквивалентное. Неэквивалентное моделирование (без выполнения условий подобия) применялось на первом этапе развития Т. и часто не давало правильных результатов даже качественного характера. Эквивалентное моделирование (с выполнением условий подобия) преобладает в Т. с середины XX в. Варианты такого моделирования с количественным измерением деформаций и перемещений разработаны в 70-е годы (Гзовский, 1970, 1975; Михайлова, 1971, 1989; Стоянов, 1977 и др.).

*Условия подобия и эквивалентные материалы для моделирования тектонических процессов.* При физическом моделировании из-за огромных размеров геобъектов и большой длительности процессов необходимо использовать эквивалентные материалы, свойства которых отвечают требованиям теории подобия. Разработка теории подобия для тектонических процессов, начатая М. Губертом (1937), Б. Л. Шнеерсоном (1947), Е. Н. Люстихом (1949), была осуществлена и доведена до расчета свойств материала М. В. Гзовским (1954, 1963, 1975) и Г. Рамбергом (1963, 1970, 1985), позже условия подобия были дополнены А. И. Шемендой (1983). Характеристики модели вычисляются по характеристикам природного объекта и множителям подобия. В таблице приведен расчет вязкостей эквивалентных материалов для трех характерных вариантов моделирования с мощностями природной толщи порядка 10, 100, 1000 км, отвечающими моделированию локальных, региональных и глобальных структур (Михайлова, 1989; [10]). Для моделирования структур на непрозрачных материалах применяют дисперсные системы на основе глины (смеси с водой или маслом), углеводов (смеси с маслом, смеси петролатума и др.), канифоли (сплавы и смеси), различные компаунды, битум, сахарный сироп и др. ([1–3, 7, 9]; Михайлова, Осокина, 1972; Стоянов, 1977; Шеменда, 1984, Семинский, 1986; Гулакян, 1987; Гончаров, Горелов, 1988). Для моделирования напряжений используют оптически активные материалы: упругие (гели желатины, ацетата целлюлозы и др.) для кратковременных процессов и вязкопластичные (растворы и гели этилцеллюлозы и др.) для длительных процессов [1, 2, 6, 10].

*Моделирование процессов формирования тектонических структур.* Моделирование формирования складок поперечного изгиба, продольного изгиба и расплющивания при разных условиях эксперимента с оценкой влияния различных факторов было проведено М. В. Гзовским с И. М. Кузнецовой, а затем с Ма Цзинь (Ma Jin) [1, 2]. Моделирование структур гравитационного всплывания с использованием центрифуги проводилось Г. Рамбергом (1963, 1975, [7]). А. М. Сычевой-Михайловой (1970, 1973) изучалась зависимость характера структур от ряда физических и тектонических факторов. Н. Б. Лебедева (1966) моделировала складчатость общего смятия, возникающую при горизонтальном сжатии слоистой толщи, вызванном вертикальными смещениями блоков коры. М. А. Гончаров и Ю. М. Горелов (1988) воспроизвели на вязкой слоистой модели процесс адвекции и возникающие при этом крупные и мелкие складки, инверсия плотности создавалась нагреванием модели снизу. Моделирование гравитационной складчатости, возникающей в слоистом чехле при его оползании с поднятий фундамента, провел Е. И. Паталаха (1970, 1981). Складки послойного течения, возникающие при вертикальном сжатии слоистой модели, исследовал Ю. В. Миллер (1982). Структуры, возникающие при

подъемах и опусканиях участков осадочного покрова, моделировали И. В. Лучицкий и П. М. Бондаренко (1967, 1976) с применением расширяющихся при нагревании материалов или искусственного магнитного поля, имитирующего силу тяжести.

Образование складок, разрывов и трещин в различных условиях изучалось на моделях в работах ряда авторов (Бокун, Борняков, Буддо, Вихерт, Гзовский, Гептнер, Гончаров, Гутерман, Кузнецова, Михайлова, Морозов, Парфенов, Паталаха, Семинский, Стоянов, Шерман, Эз и мн. др.; [3–5, 9, 10,]). В большинстве случаев складкообразование сопровождается трещино- и разрывообразованием, так что разделение этих процессов достаточно условно. Образование структур нескольких типов, в том числе конседиментационных структур и дислокаций, моделировал П. М. Бондаренко (1976, 1989) [10]. При ведущей роли силы тяжести с использованием центрифуги моделировалось образование соляных куполов и гравитационной складчатости скольжения в слоистой толще, сорванной с основания, и т. д. [3], а также складчато-надвиговых структур (J. Dixon, 1991). А. Н. Бокун (1981, 1985, 2000) исследовал на слоистых моделях образование соляных структур при ведущей роли вертикальных движений блоков основания; покровно-складчатых структур, возникающих в осадочной толще в процессе континентальной субдукции [4]. А. И. Шеменда, сам (1983, 1989, 1994) и с соавторами (Schemenda et al., 2000, 2001), выполнил цикл работ по моделированию процессов тектоники плит, прежде всего субдукции, на упругопластических материалах.

Моделирование разрывообразования. М. В. Гзовский (1953, 1960) [1, 2] в связи с разработкой физической теории образования тектонических разрывов изучал формирование крупных тектонических разрывов и причины волнистости их простирания, образование и развитие разрывов при формировании складок, а также в зоне скалывания над сдвигающимися блоками и т. п. Образование в однородной модели разных генераций трещин, отвечающих последовательным стадиям ее деформирования, изучала Т. П. Гептнер (1970). С. Стоянов (1977) исследовал на пластичных моделях образование вторичных нарушений у концов сдвигового разрыва, а также строение зон скалывания над контактами движущихся блоков. А. Н. Бокун (1981, 1985) исследовал на слоистых моделях образование трещинных структур в моделях флексурного изгиба. В. Г. Гутерман [3] исследовал на моделях с использованием центрифуги образование структур растяжения разного типа, в том числе аналогов срединно-океанского хребта. Исследованиям процессов разломообразования посвящен цикл работ С. И. Шермана с С. А. Борняковым и В. Ю. Буддо, они изучали на моделях развитие и строение зон разломов разного типа, области их динамического влияния, стадии развития, фрактальные размерности и т. д. [4, 8, 9]. Моделирование структур осадочного чехла над активными разломами фундамента с целью изучения механизма их

образования проводилось А. В. Михайловой (1989, 2002), результаты были использованы Григорьевым и др. (1979, 1987) для интерпретации современных движений [5, 8, 10]. Данные моделирования и расчетов (в одинаковой постановке) показали соответствие с данными геодезии о движениях поверхности чехла над разломами основания и стали основой метода совмещения экспериментов с теоретическими расчетами при исследованиях в Т. (Григорьев, Михайлова, 1985). Библиографию работ по физическому моделированию можно найти в обзоре (Громин, Запороженко, 1971), а также в книгах ([1–4, 7–10]; Методы моделирования..., 1988).

*Исследования напряжений в моделях тектонических структур с помощью поляризационно-оптического метода* были начаты М. В. Гзовским (1954, 1960) [1, 2]. В лаборатории Т. ИФЗ АН СССР были созданы новые фотоупругие, фотовязкие и фотовязкопластичные низко модульные материалы для моделей, исследованы их свойства. Разработаны методики изучения напряжений в упругих и неупругих моделях; изучены поля напряжений складок поперечного и продольного изгиба в однородной или слоистой упругой толще, впервые исследованы напряжения в вязкопластичных моделях складок поперечного изгиба (Гзовский, Кузнецова, Осокина, 1960; [1, 2, 10]). С помощью того же метода были изучены напряжения в упругих моделях складок продольного изгиба и кольцевых структур, а также флексур, зон сдвига и некоторых других структур (Лучицкий, Бондаренко, 1969, 1973, 1976, 1985; Бондаренко, 1976, 1989, 1990, 2002).

*Исследования влияния разрывов в земной коре на ее напряженное состояние* стали с конца 50-х годов отдельным направлением [Гзовский, 1963, 1975]. Позднее в лаборатории Т. ИФЗ АН СССР была разработана методика изучения перестройки поля напряжений вблизи разрывов в моделях из низко модульных материалов, позволяющая имитировать их закрытыми нарушениями с трением между берегами (Гзовский, Осокина, Цветкова); [2, 10]. С применением этой методики выполнено несколько циклов исследований перестройки однородного исходного поля напряжений, обусловленной отдельными разрывами и их простыми системами. Изучены ло-

кальные поля напряжений в моделях со сложно построенными разрывами разной формы (Гзовский, 1970, 1971; Гзовский и др., 1971, 1973, 1974); с единичным разрывом, с системами из двух разрывов, с мелкими разрывами в поле крупного (Осокина, Цветкова, 1979, 1980; Цветкова, 1979; Осокина, 1989; [2, 10]). В лаборатории Т. ИФЗ СО АН СССР исследованы поля напряжений систем из двух и трех разрывов, имитирующих зоны их сочленения (Мирошниченко, 1986; Шерман и др., 1986; [9]).

С использованием аналогичной методики рядом авторов исследовались локальные поля напряжений в моделях со сложными системами разрывов, имитирующими разрывную структуру: сейсмоактивных регионов, рудных полей и месторождений, отдельных районов и геоструктур, в частности, изучались напряжения в моделях ряда сейсмических районов Евразии — Памиро-Тянь-Шаня, Ирано-Туркмении, Копетдага, зоны разломов Сан-Андреас и т. д. ([1, 2]; (Парфенов, 1967; Осокина и др., 1979; Фатхуллаев, 1981; Гущенко, Цветкова, 1986; Бондаренко, 1990; 2002 и др.; [8, 10]), а также работы В. А. Королева, Т. Игамназарова, В. И. Лыкова, В. И. Поминального, В. А. Петрова, Л. А. Черкашина и др.

*Математическое моделирование* выполняется с использованием аналитических и численных методов, широко распространено применение метода конечных элементов (таблица).

*Исследования процессов образования тектонических структур* отражены в работах М. Био, Г. Рамберга, А. Сэнфорда, В. Чепла, А. С. Григорьева, В. Г. Гутермана, Л. И. Лобковского, Е. В. Артюшкова, В. П. Мясникова и др. В значительной части этих работ исследовалось образование складок в условиях продольного сжатия или поперечного изгиба. Рассматривались также задачи, посвященные: гравитационной неустойчивости и изостатическим движениям (Артюшков, 1965, 1966, 1967; Ramberg, 1968), деформированию литосферы над конвекционными потоками (Григорьев, 1974), деформированию тел под действием сил гравитации (Григорьев, 1972; Артюшков, 1979), при фазовых превращениях и движениях фазовых границ (Гутерман, Сигалов, 1972; Гутерман, 1977), автоколебаниям в геологических процессах (Лукьянов, 1980, 1985) и т. д. Многими

#### Моделирование на вязкопластичных эквивалентных материалах (Михайлова, 1989)

Мощность моделируемой толщи, км	Множители подобия				Нормальное напряжение $\sigma^m$ в модели, г/см <sup>2</sup>	Вязкость при $\sigma_{min}$ , Пуаз	
	$C_1$	$C_\sigma$	$C_t$	$C_\eta = C_\sigma \times C_t$		объекта	модели
10	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-10}$	$10^{-15}$	0 – 10	$10^{21}$	$10^6$
100	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-11}$	$10^{-17}$	0 – 1,0	$10^{21}$ $10^{20}$	$10^4$ $10^3$
1000	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-11}$	$10^{-18}$	0 – 0,1	$10^{21}$ $10^{20}$ $10^{23}$	$10^3$ $10^2$ $10^4$

авторами применялись классические методы теории упругости и гидродинамики, реже теории пластичности, решения строились для однородной линейной среды в предположении малой величины деформаций и углов поворота. Сегодня активно используется метод конечных элементов. Библиографию работ до 1972 г. см. в обзорной статье (Григорьев, Ионкин, 1972), за 1971–1985 гг. — в обзоре (Адамович и др., 1986).

Важный вклад в развитие теоретической Т. внесли работы А. С. Григорьева. Его исследования включают три цикла. Первый цикл — решение классическими методами механики сплошной среды ряда задач о напряжениях и деформациях земной коры при различных механизмах деформирования (для простейших геометрических и физических моделей геосреды). Были решены задачи об образовании надвига, об изгибе осадочного чехла при вертикальных движениях блока фундамента, о деформировании литосферы над конвекционными потоками, об образовании складок продольного изгиба большой мощности и амплитуды (Григорьев, 1971, 1974; Григорьев, Ионкин, 1972). Второй цикл — решение задач с усложненной физической моделью среды, приближающей ее к условиям в тектоносфере. Прежде всего это задачи о напряжениях и деформациях в литосфере с учетом изменения с глубиной ее вязкости при изменениях состава слоев, температуры и гравитации (Григорьев, 1974). Третий цикл — разработка основ тектонофизической интерпретации современных движений на базе решения задачи о смещениях поверхности, напряжениях и деформациях слоя над разбитым на блоки фундаментом при типичных механизмах деформирования коры (Григорьев и др., 1979, 1987 и др.); [5]). В статье (Григорьев, 1989) [10] рассмотрены вопросы постановки задач математического моделирования в тектонике.

*Исследования поля напряжений в окрестностях разрыва.* Работы с решением задачи о поле напряжений около трещины скола делятся на две группы. В работах первой используется континуальная теория дислокаций, задается скачок смещений на разрыве (Chinnery, Press, Maruyama, Oike и др.). В работах второй используется теория упругости, задаются исходное поле напряжений и взаимодействие берегов, а скачок смещений определяется. В ряде работ этой группы постановка задачи сильно упрощена (Inglis, Starr, Anderson, Kasahara и др.). Общее решение двумерной задачи для сдвигового разрыва с отрывами у концов в условиях сжатия и при наличии трения берегов получено Б. В. Костровым и В. Н. Фридманом (1975). С использованием этих результатов в работе Д. Н. Осокиной и В. Н. Фридмана [5] решение двумерной задачи для сдвиговой трещины с трением в условиях сжатия получено в аналитической форме и реализовано: построены карты характеристик тензора напряжений (компонент, величин и траекторий главных напряжений и т. п.) в зависимости от параметров задачи (ориентации

разрыва, коэффициента трения, величин главных напряжений).

Трехмерное локальное поле напряжений в слое, рассеченном закрытым разрывом с трением, построено путем наложения поля одноосного сжатия по оси  $z$  на  $2D$ -поле разрыва в плоскости слоя  $xy$ . Главное напряжение  $\sigma_z$  принималось либо постоянным — вариант I, либо равным весу пород — вариант II (Осокина, 1989, 2000, 2002). На основе  $3D$ -поля была изучена группа механизмов деформирования слоя с разрывом для варианта I. Построены изолинии: главных напряжений, параметров поля, кулоновых напряжений  $\tau_c$ , траектории осей и схемы прогноза вторичных нарушений (рис. 1, А–Е), изучена зависимость этих полей от параметров механизма. Проведено районирование зоны разлома по характеристикам шаровой и девиаторной частей тензора напряжений — всестороннему давлению  $P$ , напряжению  $\tau_{\max}$ , отношению  $P/\tau_{\max}$ . На основе наложения карт двух характеристик ( $P/\tau_{\max}$  и  $\tau_{\max}$  либо  $P$  и  $\tau_{\max}$ ) выполнен прогноз областей, благоприятных для разрушения (рис. 1, Г, Д). Для варианта II изучено размещение в зоне разрыва объемов с полями разного типа (разной ориентацией осей) и морфология поверхностей раздела между ними, отражающая напряженное состояние слоя (рис. 1, Ж–К) (Осокина, 1989, 2000, 2002) [4, 8, 10].

С. И. Шерман с сотрудниками [9], А. Н. Адамович (1989) и др. получили численные решения нескольких двумерных задач о сочленяющихся разрывах, а также об одиночных разрывах в полупространстве и вычислили характеристики активности разрывов или их комбинаций в зависимости от геометрии задачи и типа нагружения [9].

*Особенности 3D-поля напряжений разрыва и схемы вторичных нарушений.* Сопоставление  $2D$ - и  $3D$ -полей напряжений разрыва, изученных с помощью расчетов и моделирования, обнаруживает, что некоторые особенности этих полей одинаковы или сходны (поворот траекторий осей вблизи разрыва с разделением их на два потока — рис. 1, А; повышение напряжений  $\tau_{\max}$  не только у концов, но и в стороне от разрыва и т. д. — рис. 1, Б). Однако в  $3D$ -поле возникает эффект переиндексации главных напряжений, что создает особенности, отсутствующие у  $2D$ -поля: прежде всего чередование около разрыва областей с разной ориентацией осей (рис. 1, А–В, Ж, З). Так, если слой горизонтален, то при  $|\sigma_a| \geq |\sigma_b| \geq 0$  в областях «растяжения» поле сдвиговое, а в областях сжатия надвиговое, но при  $\sigma_z \approx \sigma_b$  в областях «растяжения» поле сбросовое, а в областях сжатия — сдвиговое (здесь  $\sigma_a$  и  $\sigma_b$  — главные напряжения исходного  $2D$ -поля,  $0 \geq \sigma_a > \sigma_b$ ). По траекториям главных осей  $3D$ -поля были построены карты прогноза вторичных нарушений в зоне разрыва для разных механизмов — по данным экспериментов (Осокина, Цветкова, 1979 а, б; 1980) и расчетов (Осокина, 1989, 2000) [8, 10]. Эти схемы резко отличались от известной схемы М. Чиннери (1966, 1969), построенной на

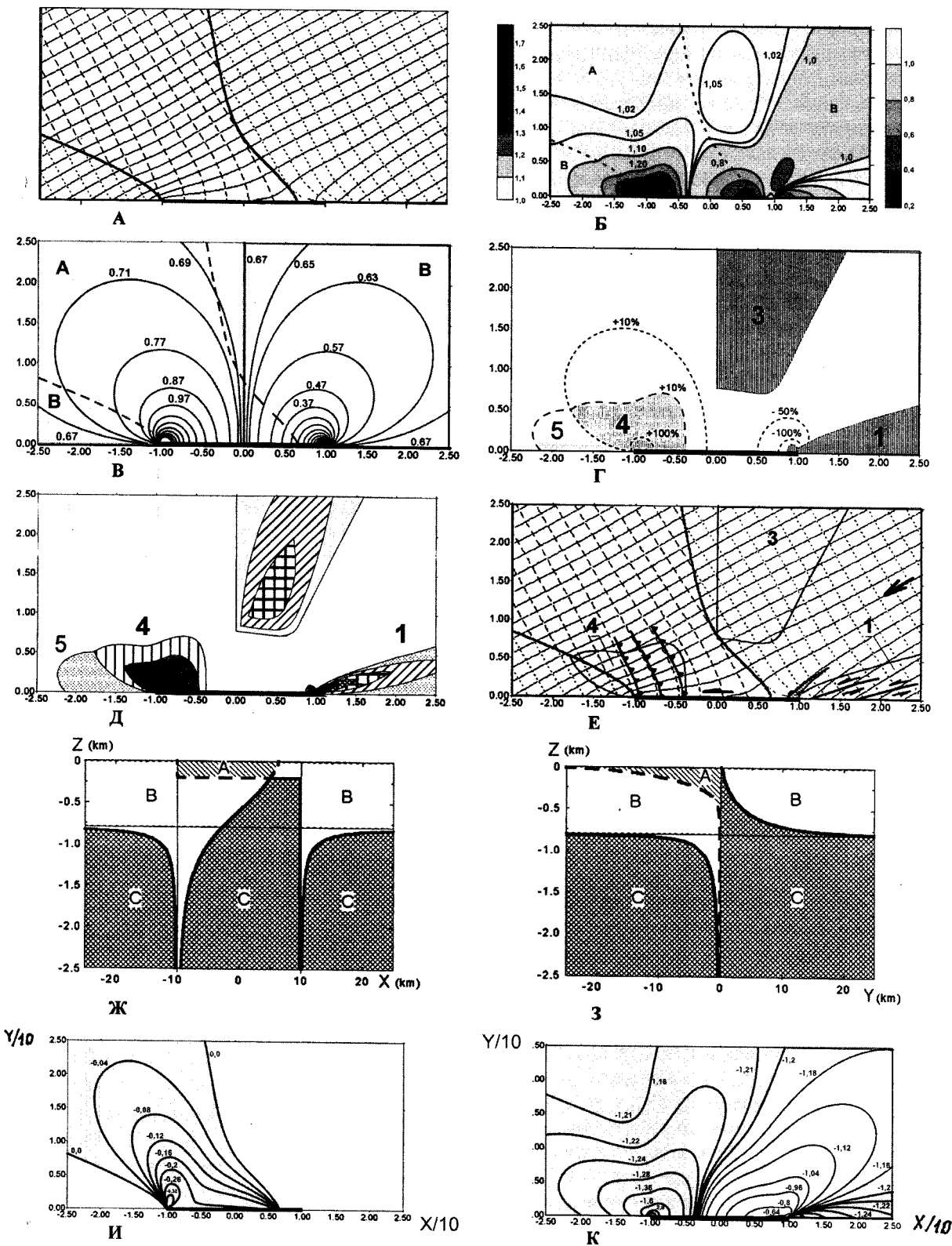


Рис. 1. Поле напряжений 3D и прогноз разрушения слоя в зоне разрыва (сдвига).

Вариант I ( $\sigma_z = \text{const}$ ). Параметры задачи:  $\sigma_a = \sigma_z = 0$ ,  $\sigma_b = -2$ ,  $\mu_\sigma = +1$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $k = 0$  (где  $\sigma_a$ ,  $\sigma_b$  – главные напряжения исходного 2D-поля,  $\alpha$  – угол между осью  $\sigma_b$  и простиранием разрыва,  $k$  – коэффициент трения). А – траектории главных осей: пунктир –  $\sigma_1$ , штрихи –  $\sigma_2$ , сплошные линии –  $\sigma_3$ ; Б – напряжения  $\tau_{\max}$ , серые тона – рост напряжений, черные – их снижение; В – всестороннее давление  $P$ ; Г – области, благоприятные для хрупкого разрушения по параметрам  $P$  и  $\tau_{\max}$ ; Д – зоны с разными изменениями параметров  $P$  и  $\tau_{\max}$  относительно исходного поля; Е – прогноз вторичных нарушений. Вариант II ( $\sigma_z = \rho g z$ ). Параметры задачи:  $\sigma_a$ ,  $\sigma_b$ ,  $\alpha$ ,  $k$  – те же, что для варианта I,  $\sigma_z = 25 \cdot z$ ,  $Z = z \cdot 10$  км,  $X = x \cdot 10$  км. Длина разрыва 20 км, кг/м<sup>3</sup>, кг/см<sup>2</sup>. Ж, З – размещение объемов с полями разных типов в вертикальных сечениях слоя (Ж – в плоскости  $xz$ , совпадающей с разрывом, З – в плоскости  $yz$ , нормальной к нему); И, К – изолинии глубины  $z$  поверхностей, разделяющих: И – верхний и средний ярусы, К – средний и нижний ярусы. Глубины границ  $z$  пропорциональны напряжениям И и К 2D-поля в плоскости слоя. Поля различных типов: надвиговое – А, сдвиговое – В, сбросовое поле – С. Случай левой подвижки (Осокина, 2000, 2002).

основе теории дислокаций: она предсказывала во всей зоне разрыва поле напряжений и вторичные нарушения одного типа — сдвигового, что неверно. Данные о напряжениях в зоне разрыва использовались для решения ряда задач, в т. ч. для выделения активных разрывов.

*Принципы мезомеханики при математическом моделировании и иерархия полей напряжений и деформаций в структурно неоднородных массивах горных пород.* Результаты моделирования локальных полей, обусловленных разрывами, позволили обосновать существование *иерархической структуры тектонического поля напряжений*, подтверждаемое натурными исследованиями, рассмотреть способы выделения полей соседних уровней и характер связи между ними (Осокина, 1987, 1989; Osokina, 1988; [5, 10]). В последнее время на основе представлений мезомеханики — нового направления геомеханики (Панин и др.) в рамках механики континуума проводятся построения реологических моделей структурно неоднородной среды с учетом ее мелко-масштабной структуры (текстуры). Так, в работах (Ребецкий, Гущенко, 1995; Толстая, Ребецкий, 2002) исследуются процессы формирования линейной складчатости в тонкорасслоенных массивах. Получены уравнения связи между параметрами тензоров деформаций и напряжений разных уровней (для слоя, многослой, крыла и замка, складчатого комплекса). Для случая, когда слой описывается моделью линейновязкого тела и допускается проскальзывание с вязким трением на границах слоев, получены уравнения состояния, определяющие многослой как анизотропное вязкое тело с параметрами, зависящими от степени сжатия складок. Показано, что рост складок может вызывать переиндексацию осей напряжений в слоях и изменение на один-два порядка вязкости складчатого комплекса. В работе (Ребецкий, Осокина, Эктон, 2002; [8]) получено приближенное аналитическое решение двумерной задачи теории упругости для систем сдвиговых разрывов с трением, использующее задание условия сухого трения в интегральной форме. Решение отвечает усреднению параметров истинного тензора напряжений на мезоуровне и позволяет анализировать взаимное влияние подвижек по нескольким разломам. Для двух разрывов обнаружена зависимость смещений берегов и поля напряжений от очередности активизации.

**Изучение складчатых структур и механизмов их образования. Задачи структурной геологии и Т. при изучении складок.** Структурная геология занимается разработкой методов фиксации и отображения на плоскости структурных форм, что обеспечивает адекватный обмен стандартной информацией о структуре объектов. Задача восполнения информации о закрытой части структуры облегчается, если известен механизм ее образования. Изучением механизмов образования пликативных структур на основе известных физических законов занимается Т. В первую очередь решается прямая

задача о механизме формирования объекта структурной геологии, т. е. определяется ход деформационного процесса (напряжения и деформации объекта, его геометрия) при заданных способе нагружения, строении и реологии объекта. Обратная задача — по типу поля напряжений, типу и величине деформаций, характеру структуры определить способ нагружения объекта. Прямая задача имеет единственное решение, у обратной — решений может быть множество.

*Выделение объектов при Т. изучении складок.* В рамках структурной геологии выделяется несколько типов объектов, для которых исследуются процессы складкообразования. Первый тип — малые тектонические формы: внутрислойные объекты (оолиты, фауна, галька и т. д., а также совокупности зерен минералов) и мелкие складки. Часть этих объектов изучает группа методов стрейн-анализа. Второй тип — отдельные складки, среди которых различают крупные («промежуточного» типа с длиной волны в первые километры — складки продольного изгиба, «штамповые» и «нагнетания») и небольшие складки внутри полной линейной складчатости, которые образуются продольным изгибом, сплющиванием и сдвигом вдоль осевой поверхности («скальванием»). Третий тип структур — крупные складчатые формы (тектонические зоны, антиклинории, синклинории, мегаантиклинории). Для них могут исследоваться процессы типа оползания со склона поднятия, пододвигания (А-субдукция), а также нагнетание (адвекция), коллизионное сжатие и т. д. Полученные таким образом объекты удобны с точки зрения морфологических классификаций, но не имеют четко обозначенных границ объектов, благодаря чему невозможно определение численных характеристик их геометрии. Для тектонофизического подхода, наоборот, необходимы объекты с четкими границами, численными параметрами геометрии и т. д., но такие объекты трудно сопоставлять с морфологическими типами складчатых форм. Один из современных вариантов классификации, предназначенный для численного анализа кинематики складчатых структур, базируется на критерии объема слоистой толщи, охватываемой деформациями (Яковлев, 1997, 2001). Выделяется как минимум семь иерархических уровней складчатых структур, включающих объекты от внутрислойных до подвижных поясов (рис. 2). Для каждого уровня выделяются морфологические типы складчатых структур со своим набором механизмов. К этим структурам относятся: 1) внутрислойные объекты (зерна или включения — I уровень; механизмы — растворение под давлением, диффузия, межзерновое скольжение и др.); 2) отдельные складки (слои — II уровень; механизмы — продольный изгиб, сплющивание, скальвание); 3) складчатые домены (крупные пачки слоев или формационные комплексы — III уровень; механизмы — укорочение, простой горизонтальный сдвиг, поворот); 4) структурные ячейки (осадочный чехол целиком — IV уровень; механизмы — адвекция, горизонтальное укорочение, оползание и др.);

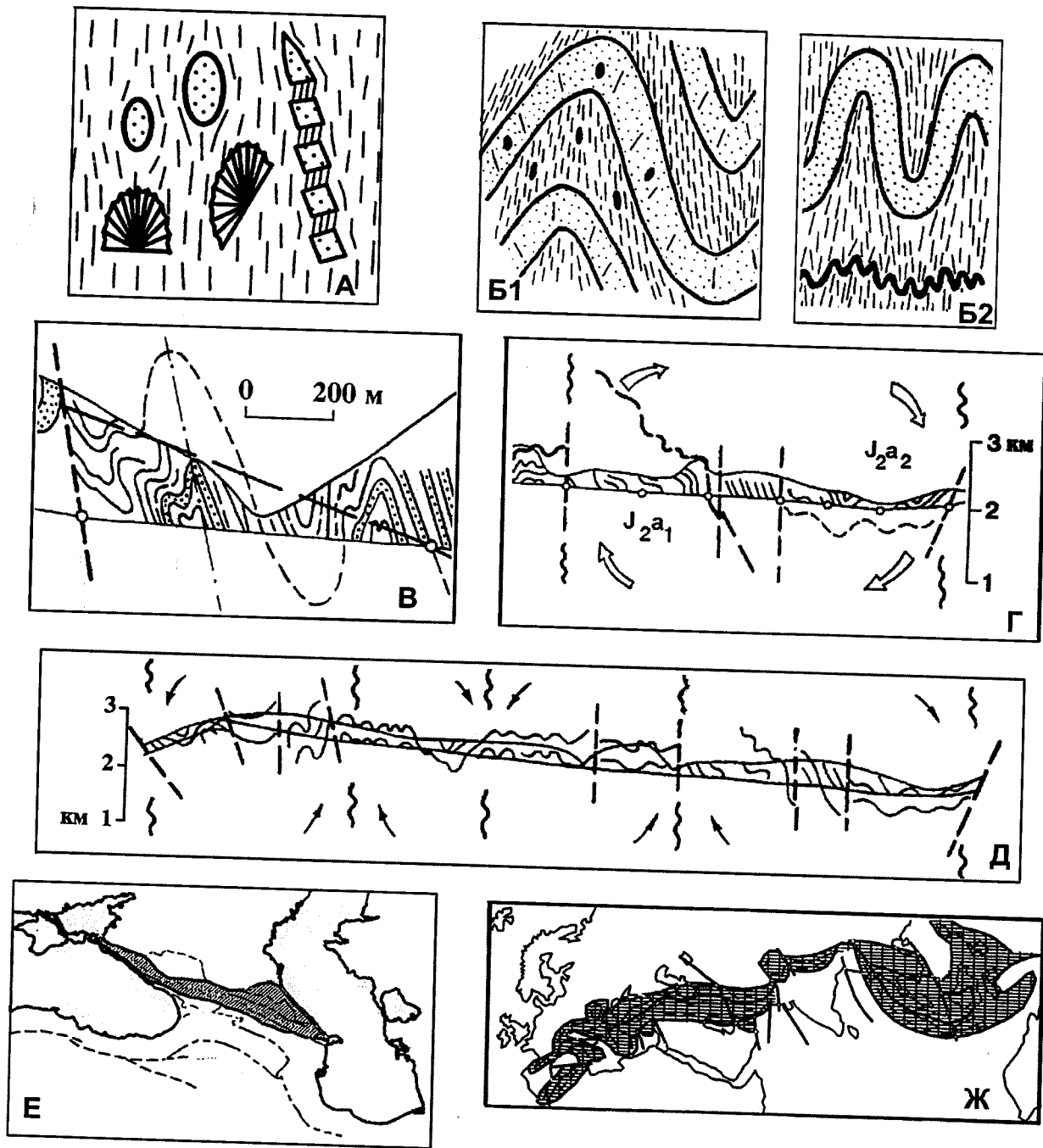


Рис. 2. Систематика иерархии структур линейной складчатости, основанная на объеме слоистости, охватываемой деформациями.

А – I – внутрислойные объекты; Б – II – отдельные складки (слои); В – III – домены или однородные участки (пачки слоев, формации); Г – IV – тектонические ячейки (осадочный чехол целиком); Д – V – тектонические зоны (кора целиком); Е – VI – мегаантиклинории (литосфера ?); Ж – VII – подвижный пояс (кора вместе с верхней мантией?).

5) тектонические зоны (кора целиком – V уровень; механизмы – адвекция; горизонтальное укорочение, оползание); 6) совокупности тектонических зон типа мегаантиклинориев (литосфера в целом ? – VI уровень; механизмы – субдукция, коллизия); 7) подвижные пояса целиком (VII уровень). Принимается, что механизмы одного уровня (напр., растворение под давлением для внутрислойных объектов) могут не учитываться при изучении объектов дру-

гого уровня (напр., отдельных складок) с другими механизмами.

*Методы изучения механизмов образования складчатости (прямая задача).* Изучение типичных механизмов образования складчатых структур обычно осуществляется с помощью физического эксперимента или теоретического решения прямой задачи механики сплошной среды. Для теоретического расчета чаще всего используются разновидности



метода конечных элементов. Физическое моделирование основано на подборе и использовании эквивалентных материалов. Эксперименты, проведенные без учета условий подобия, не могут быть использованы для восстановления механизма формирования структуры. Число видов складчатых структур, которые описаны методами механики сплошной среды (аналитическими или численными), достаточно ограничено. Это складки единичного вязкого слоя, крылья складок в чередованиях компетентных и некомпетентных пород, различные диапировые структуры. С помощью центрифуги смоделирована складчатость следующих генетических типов: оползания, бокового давления, адвективная (диапировая). На моделях с нормальной силой тяжести воспроизводятся отдельные складки продольного и поперечного изгиба или ограниченные по объему комплексы таких складок. Таким образом, большое число видов складчатых структур пока не имеет корректных с точки зрения механики модельных аналогов. Тип, величина деформации и геометрия некоторых складчатых структур могут исследоваться с помощью расчетных геометрических моделей.

*Методы исследования механизмов складкообразования натуральных объектов.* Для изучения механизмов образования природных складчатых структур (при решении обратной задачи) в основном используется ряд методов структурной геологии. По данным о залеганиях слоев и разрывов строятся структурные разрезы и карты, которые вместе с информацией о перемещениях по разрывам и о наклоне осевых поверхностей складок дают представление о направлении и величине перемещения объемов слоистых горных пород. Постулат о неизменности длины слоя при деформациях позволяет оценивать величины перемещений в средних и крупных складчатых структурах. Отбор ориентированных образцов и применение методов стрейн-анализа позволяют получить информацию об ориентировке и типе эллипсоида деформаций, имевших место в небольших объемах горных пород. Для исследования структур предгорных прогибов используются процедуры построения сбалансированных разрезов, которые дают достаточно точную картину перемещений отдельных блоков и надежную величину сокращения всей структуры. Попутный сбор информации о малых структурных формах (парагенетических структурах) и определение по ним ориентировок осей напряжений позволяют приблизиться к пониманию того, какие механизмы могли, а какие не могли создать изучаемую структуру. Однако процедуры сопоставления натуральных данных с результатами теоретических исследований разработаны слабо — главным образом используется иллюстрирование на качественном уровне природных структур результатами экспериментов, не противоречащих применяемой концепции. В последние годы разработаны качественные методы сопоставления численных геометрических параметров природных и экспериментальных структур, относящихся к не-

скольким рангам (по охвату объема слоистых толщ). При подтверждении на качественном уровне предположения о том, что конкретные природные структуры возникали при действии простого механизма, описываемого численной моделью (или комбинацией таких механизмов), есть возможность сравнивать такие структуры на основе численных характеристик, т. е. на базе корректного физического решения прямой задачи.

*История и результаты исследований процессов складкообразования.* Отделить чисто тектонофизические исследования механизмов образования складчатости от структурно-геологических и тектонических (геодинамических) сложно. В XIX и 1-й пол. XX в. проводились эксперименты по образованию складок и диапиров, но еще без соблюдения условий подобия, а также первые наблюдения за деформациями пород. Начало собственно тектонофизических исследований связано с работами В. В. Белоусова и М. В. Гзовского в СССР в 1950–1955 гг. и Г. Рамберга в Европе. Примерно тогда же Г. Клоос закончил исследование оолитов в Аппалачах (1947), положив начало полевому изучению складчатых деформаций.

Позже были выполнены исследования процесса образования простых складок в единичном слое: аналитические М. Био (1961) и Г. Рамбергом (1961) и численные методом конечных элементов, которые привели к созданию полноценных моделей складок единичного вязкого слоя П. Хадлестонем и О. Стефансоном (1973). Основные результаты изучения механизмов образования складчатости на этом этапе связаны с предложенной В. В. Белоусовым (1945, 1989) единой морфологической, кинематической и генетической классификации складок и складчатости. При этом платформенные прерывистые складки считались штамповыми (поперечного изгиба), промежуточные, развитые в предгорных прогибах (коробчатые и гребневидные), — диапировыми (нагнетания), а полная линейная складчатость именовалась складчатостью бокового давления (ее природа оставалась неясной).

В рамках этой методологии требовалось верно определить морфологический тип складок (складчатости), а генезис объекта диктовался уже его положением в классификации. Образование отдельных относительно мелких складок в результате бокового сжатия (продольный изгиб) не оспаривалось, однако причины бокового сжатия указывались от движений континентов до локального внедрения диапира. В это время были созданы модели нескольких типов складчатости: оползания со склона поднятия, бокового давления ([3], Диксон, 1991); адвективной (Гончаров, 1988); сокращения основания осадочной толщи (Ларин, 1980) и др. Диапировые структуры как крупные складчатые формы изучались с использованием центрифуги Г. Рамбергом (1963, 1970, [7]), А. М. Сычевой-Михайловой (1970, 1973), В. Г. Гутерманом (1974, [3]). К этому периоду относятся также многолетние работы по целена-

правленному сбору полевого материала в складчатых сооружениях нескольких типов группами М. В. Гзовского и В. В. Белоусова. Следует отметить разработку гипотезы «глубинного диапира», или «адвекции», которая опиралась на полевые материалы и на моделирование (итоговая работа по Б. Кавказу В. Н. Шолпо, Е. А. Рогожина, М. А. Гончарова, 1993).

К 1975–1985 гг. умами геологов завладела тектоника плит, и интерес к исследованиям механизма складкообразования значительно ослабел. К этому времени в Европе и Сев. Америке в рамках структурной геологии были созданы основы методов изучения складчатости, связанные с внутрислойными объектами (стрейн-анализ, разработанный Дж. Рэмзи и М. Хубером [11], Н. Фраем, 1979, Д. де Паором, 1988, и др.), и методы построения сбалансированных разрезов через складчато-надвиговые предгорные прогибы — обзорная работа Н. Вудварда, 1985). Эти два направления в России по ряду причин оказались очень слабо развитыми, за исключением работ А. К. Худолея (1992) и А. В. Прокопьева (1989, 1999).

Примерно с 1985 г. принципиальных прорывов в тектонофизических методах исследования складчатости в мире не наблюдалось. Все работы уточняют уже известные направления и методы. В России был выполнен цикл исследований по разработке методов качественного и полуколичественного сопоставления геометрии природных складчатых структур разного ранга с результатами физического и численного моделирования (Яковлев, 1997, 2002; [8]). В частности, было показано, что природная складчатость Б. Кавказа на иерархическом уровне тектонических зон может быть описана комбинацией двух механизмов — адвекции и примерно двукратного укорочения.

*Изучение тектонических напряжений и деформаций.* Исследования напряжений были начаты М. В. Гзовским (1954). Он создал учение о тектонических полях напряжений, разработал методы их реконструкции по трещинам и моделирования, впервые наблюдал эти поля в природных структурах с целью определения механизмов их образования [1, 2]. Методы расчета параметров тектонических напряжений и приращений сейсмоструктурных деформаций активно развиваются в последние десятилетия в Т. на базе анализа совокупностей сколов, полученных по данным о трещиноватости или о механизмах очагов. Они стали основным инструментом тектонофизических исследований, используемым в задачах поисковой геологии и оценки сейсмического риска. Обзор этих методов дан в работе Ребецкого (2002). Сначала изучение напряжений ограничивалось верхними слоями земной коры, сегодня же получены оценки ряда параметров тензора напряжений почти всех сейсмоактивных областей земной коры и глубокопогруженных участков литосферы — слэбов (Гущенко, Юнга, Ребецкий, Майкл и др.). Методы исследования напряжений и деформаций в массивах можно разделить на мето-

ды структурного анализа и методы квазипластического анализа. Последние позволяют определять не только ориентировку главных осей напряжений, но и вид эллипсоида напряжений, а также рассчитывать сейсмоструктурные деформации (Костров, 1975).

*Методы структурного анализа напряжений* базируются на принципах механики разрушения и связывают ориентацию сколового разрыва с ориентацией главных напряжений (Becker, 1893; Anderson, 1951; Гзовский, 1954).

Метод М. В. Гзовского (1954) основан на предположении о разрушении горного массива согласно теории прочности Кулона — Мора [1, 2]. Использовались данные об ориентации плоскостей пар сколов, сопряженность которых оценивалась по направлениям скольжения их бортов. Метод нашел широкое применение у тектонистов, геологов-разведчиков, горняков, с его помощью были изучены поля напряжений земной коры многих районов. С конца 50-х годов определение осей современного поля напряжений сейсмологи стали проводить по механизмам очагов землетрясений. Их метод, так же как и метод Гзовского, базировался на механике разрушения, но вместо гипотезы Мора использовался критерий прочности максимальных касательных напряжений  $\tau_{\max}$ .

Метод П. Н. Николаева (1977, 1978, 1992) является развитием метода М. В. Гзовского и дополнен: 1) использованием для определения положения осей напряжений не сопряженной пары сколов, а совокупности сколовых трещин, замеренных в одном обнажении, участке и т. д. На диаграммах выделялись максимумы плотности полюсов сколов, что позволяло находить несколько систем трещин; 2) использованием характера асимметрии максимумов трещин, что позволяло выделять среди них сопряженные системы, определять ориентацию осей напряжений и проводить их индексацию; 3) использованием статистической обработки данных об ориентации осей напряжений локальных объемов для восстановления осей напряжений регионального поля.

Методы структурного анализа сколов были первыми специальными тектонофизическими методами изучения тектонических напряжений. Но массовое применение их показало, что результаты в ряде случаев оказываются неоднозначными.

*Методы квазипластического анализа напряжений* опираются на положения, аналогичные постулатам дислокационной теории пластичности Батдорфа — Будянского, согласно которым заметная часть деформации возникает за счет смещений по разрывам или трещинам. В основе большинства этих методов лежат три предположения (Гущенко, 1982): 1) при упругопластическом деформировании переход части упругих деформаций в необратимые, вызывающий диссипацию энергии в макрообъеме геосреды, может происходить за счет смещения берегов как новых, так и уже существующих трещин и разрывов разного масштабного уровня, произвольно ориентированных относительно направлений

главных напряжений; 2) каждое смещение вдоль поверхности трещины возмущает поле напряжений более низкого уровня, но не влияет на кинематику трещин своего масштаба; 3) направление среднего вдоль поверхности скола смещения совпадает с направлением действия среднего на поверхности касательного напряжения, отвечающего искомому для квазиоднородного макрообъема тензору эффективных напряжений. Среди методов дислокационного анализа, использующих данные положения, наиболее известны методы кинематического анализа О. И. Гущенко (1975, 1979), нахождения максимума «функции совместности» С. Л. Юнга, right dihedral Ж. Анжелье (1984) и right trihedra Р. Лайла (1986). Методы, близкие к указанным, развивались французскими учеными Е. Карэ, Дж. Мерсье, А. Этчкопар, а также в США Дж. Гефардом и А. Майклом (Michael) и др. Особенностью методов кинематического анализа и right trihedra является использование графических построений для локализации областей возможной ориентации главных осей напряжений, а также создание алгоритмов проверки принадлежности каждого из сколов к выявляемому полю напряжений, на основе которых создаются однородные выборки сколов. Эти выборки отвечают квазиоднородным этапам деформирования макрообъемов и являются, как и параметры тензора напряжений, результатом реконструкции. В методе нахождения максимума «функции совместности» и ему подобных проводится численный расчет параметров тензора напряжений на основе определения такого тензора напряжений, для которого сумма скалярных произведений вектора касательных напряжений и вектора подвижки на плоскостях сколов достигает максимума. В методах Ж. Анжелье и Е. Карэ, Дж. Мерсье совмещены оба подхода: путем графического анализа сколов их разделяют на однородные выборки, а затем (используя метод, подобный методу С. Л. Юнга) определяют параметры тензора напряжений.

Метод кинематического анализа (О. И. Гущенко, 1973, 1975, 1979) стал одним из эффективных методов дислокационного анализа. Он позволил преодолеть ряд трудностей структурного анализа, перейти к более надежному построению траекторий, определять параметры поля напряжений  $\mu_\sigma$ ,  $\tau_n/\tau_{max}$ . С его помощью были восстановлены по трещинам траектории осей палеонапряжений ряда участков Средней Азии, а по механизмам очагов сильных землетрясений — траектории мегарегионального поля напряжений ряда сейсмоактивных регионов Евразии (Гущенко, 1979, 1982, 1996; Гущенко и др., 1977, 1990 и др.). Использование этого метода в тектонике и Т. расширило круг специалистов, ведущих изучение тектонических напряжений, и инициировало дальнейшие исследования в данной области.

Ж. Анжелье и другие французские геологи изучили палеонапряжения ряда районов Европы, а также о. Тайвань (1986). С. Л. Юнга на основе метода нахождения максимума «функции совместности» (1979) по механизмам очагов восстановил поле со-

временных напряжений Средней Азии и Гармского полигона (1988). Современные напряжения Калифорнии были изучены по механизмам очагов с использованием метода Майкла (Гефард, 2001). Применение методов этого направления в областях формирования залежей углеводородов и других полезных ископаемых позволило выявить связи их расположения с полем палеонапряжений (Васильев, 2001; Сим, 2002; и др.).

Методы квазипластического анализа напряжений в реальных геомассивах более перспективны, чем методы структурного анализа. Они позволяют найти эффективные алгоритмы выделения однородно деформированных макрообъемов, а также сочетать графические приемы формирования однородных выборок сколовых трещин (механизмов очагов) и численные приемы нахождения максимума «функции однородности».

Метод катакластического анализа сколов (Ю. Л. Ребецкий, 1997, 2000, 2003; [4]), так же как и другие методы, исходит из анализа данных о совокупностях сколов, но в качестве основной гипотезы использует энергетические критерии, определяющие диссипацию внутренней энергии для каждого скола и ее максимальность на искомом тензоре напряжений. Метод позволяет в рамках единой концепции определять все компоненты и параметры тензоров тектонических напряжений и приращений квазипластических (трещинных) деформаций, а также получать оценки эффективных параметров прочности хрупких массивов горных пород. На базе выделения в изучаемых массивах однородно деформируемых макрообъемов созданы алгоритмы независимой, но согласованной оценки параметров тензоров напряжений и приращений квазипластических деформаций. Этот метод закладывает основы направления экспериментального изучения состояния и свойств массивов горных пород в их естественном залегании. Реконструкция осуществляется в три этапа.

Алгоритм метода базируется на модели идеально упругого тела, содержащего множество готовых разрывов, по которым могут происходить смещения при достижении предельных условий, задаваемых законом Кулона — Мора. На определенном уровне осреднения эта модель — упругопластическое упрочняющееся тело. При оценке параметров квазипластического деформирования используются энергетические критерии. Для нахождения истинного напряженного состояния параллельно определяют параметры тензора квазипластических деформаций и возможные напряженные состояния, а истинным считается то из них, у которого для рассчитанного тензора квазипластических деформаций диссипация энергии максимальна. Этот алгоритм составляет основу первого этапа реконструкции, на котором определяются три угла Эйлера, задающие ориентацию главных осей и соотношение главных значений этих тензоров (коэффициент Лоде–Надаи для напряжений и для деформаций), а также фор-

мируются однородные выборки трещин скола — механизмов очагов (Ребецкий, 2001).

На втором этапе для определения всестороннего давления и модуля максимального касательного напряжения используется анализ напряженных состояний на диаграмме Мора и результаты экспериментов с образцами горных пород (Byerlee, 1967). Эксперименты показали, что прочность образцов пород, и сплошных, и содержащих дефекты, устанавливается предельным условием Кулона — Мора, характеризующим, с одной стороны, прочность ненарушенного массива, а с другой, сопротивление сухого трения вдоль поверхностей существующих трещин. Использование диапазона прочности реальных геомассивов позволяет с помощью построения диаграммы Мора для «редуцированных» напряжений (Ребецкий, 2003) определять относительные величины напряжений. На основе энергетического подхода предложен способ выделения плоскости, реализованной в очаге землетрясения как нодальной плоскости, для которой величина снимаемых напряжений наибольшая.

На третьем этапе осуществляется оценка параметров эффективной прочности геомассивов (коэффициентов внутреннего трения и внутреннего сцепления), а также порового давления флюида. Используется уравнение, определяющее величину вертикальных напряжений на горизонтальных площадках, следующее из теории пологих оболочек и учитывающее градиент касательных напряжений, действующих на вертикальных площадках. Расчеты, выполненные для земной коры Юж. Курил и Японских островов, позволили оценить верхний уровень величины эффективного внутреннего сцепления, а также определить зависимость величин и от вида напряженного состояния.

*Методы квазипластического анализа остаточных деформаций.* Определение тензора приращений или скорости квазипластических деформаций за счет вклада быстрых движений по разрывам в очагах землетрясений базируется на суммировании вкладов от каждого землетрясения. В методе расчета сеймотектонических деформаций Ю. Н. Ризниченко суммируются все землетрясения, попадающие в выбранный макрообъем, а магнитуды землетрясения определяют весовой множитель каждого вклада. В этом случае искусственно завышается вклад сильных событий. Этот недостаток устранен в методе расчета среднего механизма С. Л. Юнги (1979), в котором вклады от каждого землетрясения суммируются без весового коэффициента, отражающего магнитуду. К методам определения тензора квазипластических деформаций относится и метод парагенетического анализа дизъюнктивных структур Л. М. Расцветаева (1982, 1987, 2002; [8]). Его основа — зависимость от параметров тензора напряжений различных структурных форм, связанных предполагаемой общностью условий образования. По характеру используемых данных определяются параметры тензора деформаций, обусловленных раз-

рывно-трещинной тектоникой. Главной проблемой метода является дешифровка натуральных структурных рисунков в рамках разработанных автором базовых геомеханических моделей дизъюнктивных деформаций (шаблонов).

*Исследования механизмов формирования тектонических структур.* Учение М. В. Гзовского о механизмах формирования тектонических структур занимает в Т. центральное место и является частью представления о генезисе изучаемого геообъекта [1, 2]. Его знание необходимо при решении большинства горно-геологических задач, таких как прогнозирование структур и их деталей на глубину и в закрытых участках при поисках, разведке и разработке месторождений, управление горным давлением, обеспечение безопасности горных работ, изучение формирования объектов глобального и регионального масштабов, создание тектонических теорий и т. д. Механизм формирования тектонических структур определяется системой внешних (и внутренних) сил, приложенных к изучаемому геообъекту или задаваемыми движениями его границ; исходными морфологией и механическими свойствами объекта; возникающими внутри него новыми полями напряжений, деформаций и разрывами.

*Классификация механизмов формирования тектонических структур* (по М. В. Гзовскому) опирается на изучаемые в механике простейшие виды деформирования (сжатие, растяжение, сдвигание, изгиб) и связана с универсальной геологической структурой — слоем. Первоначально она включала несколько групп самых простых механизмов: 1) поперечное (слою) сжатие, вызывающее его «растаскивание» (будинаж); 2) сжатие вдоль слоя с областями выжимания и нагнетания (подразделяющееся на продольное расплющивание — с увеличением мощности в замках и продольный изгиб — при наличии проскальзывания по границам слоев); 3) поперечный изгиб горизонтального слоя с образованием антиклинали, вызванный поднятием блока основания, с двумя зонами трещиноватости; 4) вертикальное и «продольное» сдвигание с зоной чистого сдвига; 5) сдвигание в обстановке сжатия (transpression) или растяжения (transtension). Параллельно были разработаны новые принципы классификации складок и разрывов [1, 2]. Характеристики механизмов формирования тектонических структур определяются требованиями их реконструкции. При этом необходимо установление однозначной связи: исходная структура — механизм деформирования — конечная структура. Решение такой задачи требует знания ряда характеристик изучаемого тектонического объекта, к которым относятся поля напряжений, разрушения и свойства объекта, в первую очередь вязкость. В этот список следует включать также упругость, длительную прочность, пластичность, температурные зависимости деформаций и т. п.; вид зависимости деформации — напряжения, поля перемещений, их скорос-

тей и градиентов скоростей. Этот перечень может быть изменен (или сокращен) в зависимости от условий деформирования тектонической структуры и метода исследования.

Исследования механизмов можно разделить на две группы: 1) изучение типичных механизмов (решение прямой задачи), при котором задаются условия деформирования и исследуются характеристики механизма (Михайлова, 1971, 2002; Григорьев и др., 1979, 1987; Бондаренко, 1989, 1990; Осокина, 1989, 2002; и др.) и 2) реконструкция механизма деформирования, т. е. выяснение способа приложения к деформируемому объекту усилий (или характера движений границ), которые вызвали формирование данной природной структуры, а также исходного строения объекта, — решение обратной задачи (Григорьев, Михайлова, 1985; Григорьев, 1989; Гущенко и др., 2000). Обе задачи рационально решать с помощью моделирования, наиболее эффективно — при сочетании физического и математического моделирования. Обратная задача решается главным образом перебором решений прямых задач.

*Исследование типичных механизмов образования тектонических структур* (прямая задача). К типичным относятся, например, названные выше сжатие, сдвиг, раздвиг, к типичным структурам — складки, разрывы, флексуры. К этой группе относятся также такие сложные механизмы, как субдукция и спрединг. Изучение типичных механизмов состоит в определении при данном способе нагружения их характеристик (действующих в деформируемом объеме на разных стадиях процесса поля напряжений или деформаций; поля перемещений, линейных и угловых; поля «разрушения», а также изменений свойств — вязкостных и др.). Моделирование тектонических структур и изучение механизмов их формирования выполняли многие авторы, в том числе М. В. Гзовский, А. Н. Бокун, С. А. Борняков, П. М. Бондаренко, Т. М. Гептнер, К. Ж. Семинский, Дж. Брюн и др. (на эквивалентных материалах), Р. Штейн и Дж. Уикхем, А. Уайттекер, М. Ботт и др., М. А. Гончаров, А. И. Шеменда, П. Бёрд (математическое и на эквивалентных материалах). Исследование механизмов формирования крупномасштабных структур, региональных и глобальных, как правило, связано с моделированием в рамках гипотезы тектоники плит. Изучаются спрединг, субдукция, внутриплитная и межплитная тектоника и т. д. Наиболее интересны работы по исследованию обобщенных моделей субдукционных зон (Whittaker, Houseman, 1992) с расчетом напряжений и действующих сил, а также деформаций. С помощью термомеханических моделей исследуются процессы в коре и мантии (Pore et al., 1998), выясняется роль гравитационных неоднородностей (Т. В. Романюк).

*Исследование механизмов формирования региональных тектонических структур* (обратная задача). Реконструкция механизма деформирования сводится к определению способа нагружения, вызвавшего тектонические деформации, и решается

однозначно, если известны исходная и конечная структура деформирования, механические свойства геобъекта, поле напряжений (деформаций), структура разрушения, а также поле перемещений. При наличии этих сведений возможно решение обратной задачи механики с определением краевых условий. Требуемые натурные данные определяются из геолого-геофизических, геодезических и специальных полевых тектонофизических исследований. Поскольку исходных данных всегда недостаточно, при решении обратной задачи следует рассматривать несколько вариантов. Примером такого моделирования может служить (Романюк, Ребецкий, 2001) изучение механизма деформирования Андийской субдукционной зоны. Краевые условия выбирались на основе представлений о взаимодействии океанской и континентальной плит, вызванном их встречными движениями. Исследовались три режима нагружения, отвечавшие трем гипотезам об источнике движущей силы, согласно которым им являются движения океанской плиты; стационарная мантийная конвекция; активное погружение нижней части океанской плиты под Юж. Америку благодаря повышенной плотности этой части. Результаты (поле напряжений по профилю) сопоставлялись с натурными данными о современном поле напряжений, полученными по механизмам очагов. Вторым критерием служило соответствие полученного поля напряжений наблюдаемой тектонике. Сделан вывод о наибольшей вероятности третьего варианта нагружения.

В сфере регионального и глобального моделирования наибольший интерес и внимание зарубежных исследователей вызывают те регионы и региональные структуры, изучение которых может наиболее эффективно прояснить отдельные и общие положения гипотезы тектоники плит. К исследованиям таких проблемных областей относятся изучение тектоники в Калифорнии (Bird, Kong, 1994) и Андах (Романюк, 2001), современной Тайваньской коллизии между континентом и островной дугой (Schemenda et al., 2001), деформаций в надвигающейся плите Аляско-Алеутской субдукционной зоны (Bird, 1996), структуры Тибетского плато с сопредельными областями и ее эволюции (Schemenda et al., 2000), проблем оз. Байкал и континентальных рифтов (Зорин, 1997 и др., 2000).

Ю. Л. Ребецкий, А. В. Михайлова,  
Д. Н. Осокина, Ф. Л. Яковлев

1. Гзовский М. В. Основные вопросы тектонофизики и тектоники Байджансайского антиклинория. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Ч. I и II. 265 с.; Ч. III и IV, 1963. 544 с.

2. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.

3. Гутерман В. Г. Механизмы тектогенеза (по результатам тектонофизического моделирования). Киев: Наукова думка, 1987. 172 с.

4. М. В. Гзовский и развитие тектонофизики / Отв. ред. Ю. Г. Леонов, В. Н. Страхов. М.: Наука, 2000. 350 с.

5. Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука, 1987. 182 с.

6. Осокина Д. Н. Пластичные и упругие низкомолекулярные оптически активные материалы для исследования напряжений в земной коре методом моделирования / Отв. ред. М. В. Гзовский). М.: Изд-во АН СССР, 1963. 133 с.

7. Рамберг Г. Сила тяжести и деформации в земной коре. М.: Недра, 1985. 399 с.

8. Тектонофизика сегодня / Отв. ред. В. Н. Страхов, Ю. Г. Леонов. М.: Изд-во ОИФЗ РАН, 2002. 436 с.

**СИНЕРГЕТИКА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ (С.)** (англ. — synergetics of geological systems) — процессы самоорганизации в открытых геологических системах, представляющие собой цепь неравновесных фазовых переходов различного иерархического класса, когда масштабы и формы самоорганизации определяются энергетическим состоянием системы, а степень самоорганизации и структурирования величиной энтропии ( $S$ ).

Термин «синергетика» (С.) был предложен в 70-е годы немецким физиком Г. Хакеном. Его работы по С. были посвящены теории самоорганизации в различных природных системах. В работах по С. излагаются общие подходы к изучению универсальных свойств явлений самоорганизации в динамических открытых системах. Особое значение при этом придается изучению роли коллективных, кооперативных эффектов в процессах самоорганизации [9].

Появление этого научного направления было подготовлено широким кругом ученых, занимавшихся созданием основ неравновесной термодинамики. Особое значение имели работы И. Пригожина и Г. Николиса (Николис, Пригожин, 1979). Физик-теоретик Швингер в своей Нобелевской лекции в 1962 г. ввел понятие о трех уровнях в науке. Первый — события, явления, факты; второй — законы, которым подчинены эти события, явления и факты; третий — инварианты или законы законов. С. может быть отнесена к разряду инвариантов.

Следует заметить, что процессы самоорганизации в неравновесных открытых динамических системах не отражают всего многообразия кооперативных синергетических эффектов, которые могут проявиться в них: синергизм, колебательные явления, гомеостазис и т. п. Поэтому С. охватывает более широкий круг явлений, возможных в геологических системах.

*Синергетические аспекты развития геодинамических систем Земли.* На базе гиперсистемы, которой является планета Земля, зарождались, функционировали и отмирали открытые неравновесные системы более низких иерархических уровней — мега- и мезосистемы, когда структуры низких иерархий объединяются в структуру высших [4]. Неравновесные системы могут длительно функционировать только в режиме прокачки через них энергии, иными словами, это открытые системы. Прекращение энергетического потока обрекает систему на пе-

9. Шерман С. И., Семинский К. Ж., Борняков С. А. и др. Разломообразование в литосфере. Новосибирск: Наука, 1991, Т. 1. 262 с.; 1992, Т. 2. 228 с.; 1994, Т. 3. 263 с.

10. Экспериментальная тектоника. Методы, результаты, перспективы / Отв. ред. А.В. Лукьянов. М.: Наука, 1989. 302 с.

11. Ramsay J. G., Huber M. I. The techniques of modern structural geology. Vol. 1: Strain analysis. London: Acad. Press, 1983. 307 p.; Vol. 2: Fold and fractures. 1987. P. 308–700.

реход в стадию консервации, когда длительность ее существования обуславливается энергетическим потенциалом за счет накопленной на предыдущем этапе энергии. С другой стороны, принцип наследования генетических черт от всех предыдущих уровней развития во многих разделах геологической науки является определяющим.

Представление об энтропии как мере беспорядка приводит к пониманию роли  $T$  и  $P$  в эволюции природных систем. Поскольку с повышением  $T$  растёт и  $S$ , то в ряду газообразный высокотемпературный флюид — гидротермальный раствор — минеральный агрегат, выпавший из раствора, происходит процесс снижения энтропии. При этом каждому из этих состояний отвечает вполне определенный  $T$ -диапазон, когда высоким  $T$  отвечает наиболее вероятное газообразное состояние системы, средним  $T$  — гидротермальный раствор, а минимальным температурам — минеральный кристаллический агрегат. Высокая структурная организация, наличие нескольких осей симметрии у кристаллов выражаются в уменьшении величины  $S$ . Например, у полиморфных разновидностей более структурированные и плотные формы характеризуются меньшей энтропией по сравнению с их менее упорядоченными аналогами.

Особенности изменения энтропии в трех типах систем (равновесных, линейных неравновесных и нелинейных неравновесных) рассмотрены в работах Ф. А. Летникова и др. [4–6].

Отличительной чертой открытых геологических систем является их многофункциональность: в них одновременно реализуется несколько процессов — переноса, растворения, кристаллизации, диффузии, конвекции, метасоматоза и т. д. Если эти процессы протекают одновременно, то они могут быть взаимосвязаны и к ним применимо соотношение взаимности Л. Онзагера  $I_{kn} = L_{nk}$ , где  $L_{kn}$  и  $L_{nk}$  — линейные коэффициенты взаимосвязи  $t$  между силами  $X$  и потоками  $I$  в двух взаимосвязанных потоках  $I_k$  и  $I_n$ .

В соответствии с теоремой И. Пригожина о минимуме производства энтропии в открытой стационарной системе при фиксированных внешних параметрах очевидна «выгодность» таких открытых систем с точки зрения энергетического баланса, поскольку режим поддержания системы в стационарном состоянии требует минимального потребления свободной энергии. Состояние таких систем может оцениваться в режиме термостатирования или гомеостазиса [4]. Иными словами, открытая система,