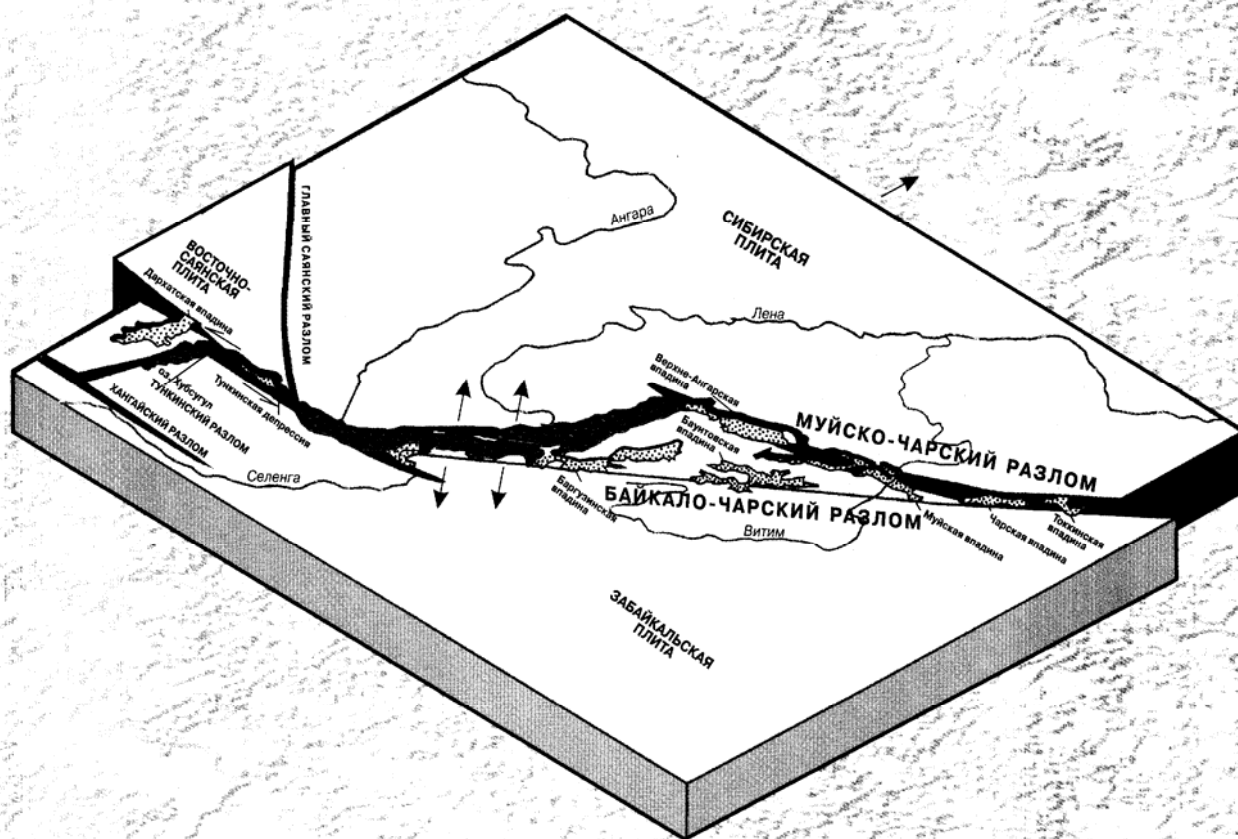


СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

# НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ



НОВОСИБИРСК  
2003

УДК 551.24 +551.14+550.34  
Н277

**Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы:** Труды Всерос. совещ., г. Иркутск, 26–29 авг. 2003 г. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. – 484 с.

ISBN 5-7692-0593-8

В книге опубликованы труды Всероссийского совещания «Напряженное состояние литосферы, ее деформация и сейсмичность», проведенного Институтом земной коры и Научным советом по тектонике Сибири в г. Иркутске 26–29 августа 2003 г. Представленные материалы посвящены описанию методов и результатов исследований напряженного состояния, глубинного строения и сейсмичности литосферы, выявлению и анализу разломно-блоковых структур, изучению кинематики крупных блоков литосферы, результатам физического и математического моделирования напряженно-деформированного состояния земной коры, а также общим вопросам геодинамики литосферы.

Книга будет полезна широкому кругу научных работников, аспирантам и инженерам, ведущим исследования по напряженному состоянию и сейсмичности литосферы.

Ответственный редактор:  
профессор *С.И. Шерман*

Заместитель редактора  
д-р геол.-мин. наук *К.Ж. Семинский*

Редакционная коллегия:  
д-р геол.-мин. наук *М.М. Буслов*, д-р геол.-мин. наук *К.Г. Леви*,  
д-р геол.-мин. наук *В.В. Ружич*, канд. геол.-мин. наук *В.А. Саньков*

Статьи публикуются в авторской редакции

*Издание осуществлено при финансовой поддержке Президиума СО РАН*

ISBN 5-7692-0593-8

© Коллектив авторов, 2003  
© Институт земной коры СО РАН, 2003

<b>Семенов Р.М., Мельников А.И., Имаев В.С. Современная геологическая структура и сейсмичность Восточной Сибири.....</b>	<b>165</b>
<b>Семинский К.Ж. Зонно-блоковая структура континентальной литосферы.....</b>	<b>169</b>
<b>Сизых В.И., Семенов Р.М., Павленов В.А. Тектоника литосферных плит и нефтегазоносность.....</b>	<b>174</b>
<b>Скляр Е.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Донская Т.В. Палеонапряженное состояние литосферы Сибирского кратона в докембрии (реконструкция и эволюция).....</b>	<b>176</b>
<b>Соболев Л.М. Глобальная и локальная динамика земных недр.....</b>	<b>180</b>
<b>Старосельцев В.С. Кинематика крупных блоков литосферы Сибирского кратона.....</b>	<b>185</b>
<b>Суворов В.Д., Мишенькина З.Р., Кучай О.А. Строение земной коры Байкальской рифтовой зоны по сейсмическим данным.....</b>	<b>188</b>
<b>Тверитинова Т.Ю. Эволюция общепланетарных полей напряжений как доказательство пульсационной динамики Земли.....</b>	<b>189</b>
<b>Трифонов В.Г. Экстремальные геодинамические ситуации.....</b>	<b>193</b>
<b>Уломов В.И. Сейсмическая опасность как отражение сейсмогеодинамического процесса....</b>	<b>197</b>
<b>Уткин В.П. Ректадукционная модель кинематики крупных блоков литосферы с синхронным проявлением конседиментационного базальтоидного вулканизма и базит-гипербазитового интрузивного магматизма.....</b>	<b>201</b>
<b>Уфимцев Г.Ф. Основные черты морфотектоники континентов.....</b>	<b>204</b>
<b>Черкасов Р.Ф. Взаимодействие континентальных и океанических тектонических поясов: проблема малой цикличности.....</b>	<b>206</b>
<b>Чиков Б.М. Режимы колебаний и волн в геосферах.....</b>	<b>209</b>
<b>Шерман С.И. Напряженное состояние, разрывные деформации и сейсмичность литосферы.....</b>	<b>211</b>
<b>Яковлев Ф.Л. Механизмы образования линейной складчатости в структурах разного ранга – модели и природные процессы.....</b>	<b>216</b>
<b>Яковлев Ф.Л., Юнга С.Л. Механизмы горообразования на примере Памиро-Тянь-Шанского синтаксиса и Алтае-Монгольского региона.....</b>	<b>220</b>

## **ЧАСТЬ 2. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ И СЕЙСМИЧНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ**

<b>Аннин Б.Д., Коробейников С.Н., Шутов А.В. Моделирование хрупкого разрушения упругих блоков.....</b>	<b>225</b>
<b>Адамович А.Н. Оценка степени стабильности напряженного состояния перемычек Байкальской рифтовой зоны (по результатам математического моделирования).....</b>	<b>229</b>
<b>Адамович А.Н., Иванова С.В., Шерман С.И. Роль температурного фактора в эволюции напряженного состояния Байкальской рифтовой зоны.....</b>	<b>233</b>
<b>Алакшин А.М. Тектонические гравитационные напряжения в земной коре района Байкальской впадины.....</b>	<b>237</b>
<b>Аржанников С.Г. Основные активные разломы, кинематика и сильные палеоземлетрясения восточной части Алтае-Саянской горной области.....</b>	<b>241</b>
<b>Аржанникова А.В., Аржанников С.Г. К вопросу о кайнозойских тектонических деформациях на юге Иркутского амфитеатра.....</b>	<b>244</b>
<b>Бакшт Ф.Б. Динамическая петрофизика сейсмоактивных горных массивов.....</b>	<b>248</b>
<b>Балуев А.С., Моралев В.М., Терехов Е.Н. Современная геодинамика палеорифтовых систем Белого и Баренцева морей.....</b>	<b>250</b>
<b>Басов А.Д. Напряженное состояние, электромагнитное излучение и акустическая эмиссия гранитов трассы Северо-Муйского тоннеля.....</b>	<b>253</b>
<b>Баталев В.Ю., Рыбин А.К., Щелочков Г.Г., Баталева Е.А., Сафронов И.В. Строение зоны Таласо-Ферганского разлома по данным магнитотеллурических зондирований.....</b>	<b>257</b>

комплексирования дают основание считать, что вытекающие из проблемы практические задачи – разработка методов прогноза землетрясений – приближаются к своему решению.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 01-05-64485), Президиума СО РАН, Минобразования (проект E02-8-45).

#### Литература

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536с.
2. Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика //Физическая мезомеханика. 2002. Т.5, №5. С.5-22.
3. Кропоткин П.Н. Тектонические напряжения в земной коре // Геотектоника. 1996. №2. С.3-15.
4. Кузнецова К.И. Напряженное состояние и устойчивость процесса деформации горных масс // Тектонофизика сегодня. Москва: ОИФЗ РАН, 2002. С.110-119.
5. Николаев П.Н. Методика тектодинамического анализа. М.: Недра,1992. 295с.
6. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.:Наука, 1993. 313с.
7. Соболев Г.А. Динамика разрывообразования и сейсмичность // Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С.67-78.
8. Шерман С.И. Развитие представлений М.В.Гзовского в современных тектонофизических исследованиях разломообразования и сейсмичности в литосфере // Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С.49-59.
9. Шерман С.И., Демьянович В.М., Лысак С.В. Новые данные о современной деструкции литосферы в Байкальской рифтовой зоне // Докл. РАН. 2002. Т.387, № 4. С.533-536.
10. Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1989. 158с.
11. Шерман С.И., Лунина О.В. Новая карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли // Докл. РАН. 2001. Т.378, №5. С.672-674.
12. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Буддо В.Ю. и др. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991. 261с.
13. Hast N. The state of stress in upper part of the Earth's crust // Tectonophysics. V.8, N3. 1969. P.167-179.
14. International Tectonic Map of the World / Chief Editor: Khain V.E. Academy of Sciences of the USSR and Commission for the Geological Map of the World. 1981.
15. Ma Jin, Ma Shengli and Lei Xinglin Fault geometry and its relationship with seismicity in the Xianshuihe fault zone // The international symposium on tectonophysics. Pergamon Press, Oxford. 1989. P.131-142.
16. Mogi K. Pressure dependence of rock strenght and transition from brittle fracture to ductile flow // Bull. Earthquakes Res. Inst. 1966. V.44. P.215-232.
17. Zoback M.L. First and Second order patterns of stress in the Lithosphere: The World Stress Map project // J. Geophys. Res., special issue. 1992. V.97, N8. P.11703-11728.

**Ф.Л. Яковлев**

*Объединенный институт физики Земли (ОИФЗ) РАН*

## **МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ В СТРУКТУРАХ РАЗНОГО РАНГА – МОДЕЛИ И ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

Определение механизма образования в тектонофизическом смысле предполагает выяснение физических закономерностей возникновения полей напряжения (или полей перемещений/деформаций) при определенном воздействии внутренних сил и внешних сил на границы структуры (граничные условия), имеющей определенные реологические свойства. Полноценные решения задач с такой постановкой существуют только для простых структур с одним слоем и для разрывных структур. Сложность структур линейной складчатости состоит в том, что сам объект обладает иерархией слоистости (и, соответственно, иерархией свойств реологических), большими величинами деформаций, а во многих случаях – многоэтапным процессом деформирования. В настоящий момент не существует механико-математической

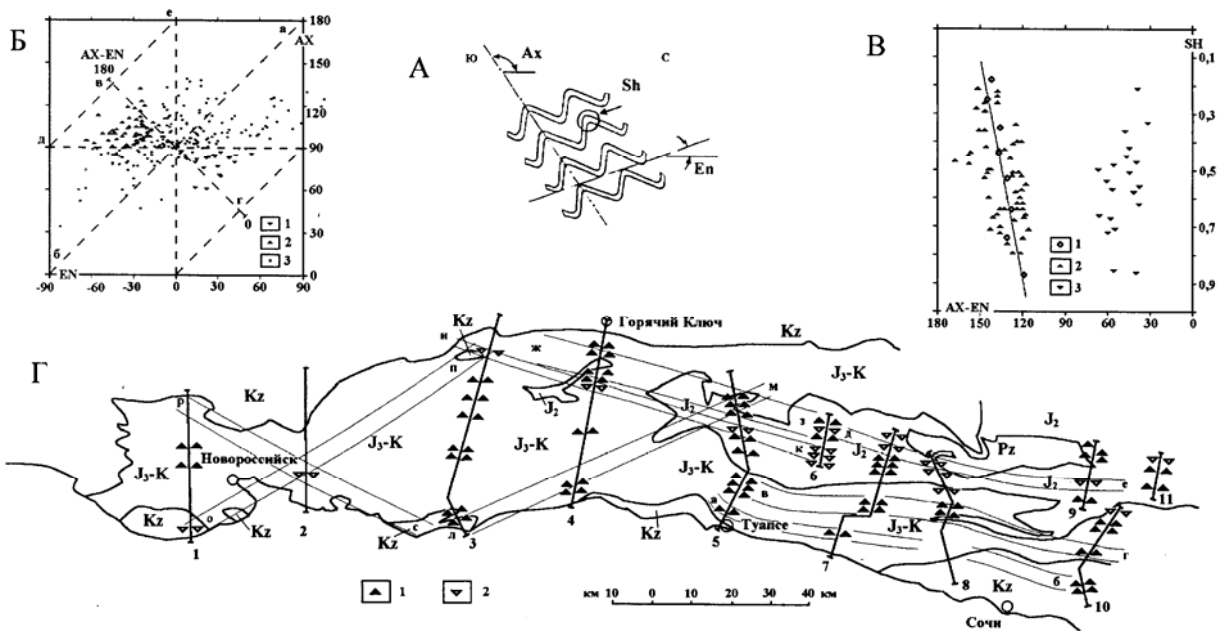
модели, которая могла бы дать полноценное решение задач для такой структуры. Единственная возможность подойти к постановке этой проблемы состоит в разрешении на первом этапе кинематического ее аспекта, – т.е. в определении числа рангов иерархии, типичных структур в каждом ранге, перечня механизмов (кинематических) их образования и разработке методов решения обратных задач для природных структур.

В структурах линейной складчатости предлагается выделять как минимум семь иерархических уровней на базе иерархических уровней слоистости, существующих в природе [1]. Для каждого уровня выделяются геометрические (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; продольный изгиб, сплющивание, скальвание); 3. складчатые домены (крупные пачки слоев или формационные комплексы – III; укорочение, простой горизонтальный сдвиг, поворот); 4. структурные ячейки (осадочный чехол целиком – IV; адвекция, горизонтальное укорочение, оползание и др.); 5. тектонические зоны (земная кора целиком – V; адвекция; горизонтальное укорочение, оползание); 6. совокупности тектонических зон типа мегантиклинорий (литосфера в целом? – VI; субдукция, коллизия); 7. подвижные пояса целиком (верхняя мантия? – VII уровень; механизмы не определены). Принимается, что механизмы одного уровня (например, растворение под давлением для внутрислойных объектов), могут не учитываться при изучении объектов другого уровня (например, отдельных складок) в которых действуют другие механизмы.

В данной работе обсуждаются кинематические механизмы образования складчатых структур осадочного чехла (IV-й и V-й уровни), а также новые данные – пример решения задачи нахождения механизма для складчатых доменов (III-й уровень).

Механизмы локальные для чехла. Для складчатых доменов основными геометрическими параметрами структуры являются три: наклон осевой плоскости (AX), наклон зеркала складок (EN) и величина сокращения складок (SH) в направлении, перпендикулярном осевой плоскости (Рис. 1А). Поскольку эти три замера геометрии домена являются достаточными для полного контроля за изменениями его формы, то существует возможность восстановления его исходной доскладчатой геометрии с помощью последовательных кинематических операций поворота, простого сдвига и растяжения [2]. В качестве конечного результата может быть получена доскладчатая длина профиля и величина его сокращения [3]. Модель этих трех кинематических операций в определенном смысле имитирует последовательное действие трех физических механизмов, но, разумеется, не может сопоставляться с реальными природными процессами.

Для исследования реальных механизмов, действующих в локальных структурах на уровне доменов, были изучены опубликованные структурные профили через Северо-Западный Кавказ, составленные Т.В.Гиоргобиани [4] и Е.А.Рогожиным [5] (Рис. 1Г). Общее количество профилей – 11, общее количество выделенных доменов, геометрия которых была измерена, – 250. Как было показано в [1], замеры геометрии доменов складчатых структур могут быть вынесены на три диаграммы AX-SH, EN-SH и AX-EN, которые позволяют достаточно надежно выявлять возможные общие и локальные механизмы складкообразования путем сравнения с их экспериментальными и расчетными моделями. Наиболее информативной с этой точки зрения является диаграмма рассеяния AX-EN (Рис. 1Б). На этой диаграмме в квадрантах вдоль “северо-восточной” диагонали (“а” – “б”) лежат точки (квадраты), которые относятся к основным “общим” механизмам образования складчатости Северо-Западного Кавказа. В двух других квадрантах (“северо-западная” диагональ, “в” - “г”) лежат точки замеров, которые относятся к механизмам “локальным”, которые могут быть названы “дуплексоподобными”, “приразломными” [1]. Эти домены характеризуются южной вергенцией (59 доменов) и северной (20 доменов). Пределом распространения первых на диаграмме является линия “д” - “е”, для которой угол между осевыми плоскостями и зеркалом складок составляет  $180^\circ$ , для вторых – аналогичная линия со значением  $0^\circ$ . Рассмотрим подробнее статистические характеристики первого облака точек. Для этого построим диаграмму (AX-EN) – SH (Рис. 1В), которая является сечением диаграммы AX – EN по линии “в” – “г”. На новой диаграмме видно, что у облака точек есть тренд к увеличению значений (AX – EN) с  $120^\circ$  до  $150^\circ$  при увеличении сокращения складок SH с 0,9 (1,1 раза) до 0,2 (5 раз).



**Рис. 1.** Локальный механизм простого сдвига в наклонных зонах, выраженный в геометрии складчатых доменов в пределах структуры Северо-Западного Кавказа. А – замеры геометрии доменов. Б – диагностическая диаграмма “наклон осевых плоскостей – наклон зеркала складок”: 1- домены северной вергенции, 2 – домены южной вергенции, 3 – домены “основных” механизмов. В – диаграмма “угол между наклоном осевых поверхностей и зеркалом складок – величина сокращения”: 1- осредненные поинтервальные значения, 2 – домены южной вергенции, 3 – домены северной вергенции. Г – геологическая схема Северо-Западного Кавказа (по материалам А.В. Маринина); показаны ареалы распространения основных стратиграфических подразделений и линии профилей: 1 – домены с южной вергенцией, 2 – домены с северной вергенцией. Пояснения в тексте.

Применив поинтервальное осреднение (через 0,1 SH, смотри таблицу), получаем восемь значений с корреляцией  $-0,935$  (крупные кружки). Это напоминает механизм простого сдвига вдоль зеркала складок - при этом возрастают угол между этими двумя направлениями и величина сокращения. Одновременно наблюдается корреляция  $0,794$  между значениями AX и SH (увеличивается наклон осевых поверхностей от  $100^\circ$  до  $110^\circ$  при увеличении сокращения складок). Если исключить из рассмотрения первое поинтервальное значение ( $-22^\circ$ ), то наклон зеркала складок также увеличивается с  $-25^\circ$  до  $-40^\circ$ . Поскольку последствия механизма сплющивания в горизонтальном направлении другие – при увеличении сокращения наклон осевых поверхностей будет стремиться к вертикали ( $90^\circ$ ), а наклон зеркала будет также увеличиваться – то это именно простой сдвиг в наклонной зоне, причем есть тенденция к увеличению наклона этой зоны при усилении деформации.

Таблица

AX	EN	AX-EN	SH	Н знач.
120	-22	142	0,18	1
107	-38	145	0,25	7
102	-39	136	0,35	3
106	-31	137	0,44	13
100	-31	131	0,53	12
101	-27	128	0,64	13
97	-34	131	0,74	9
99	-20	119	0,87	1

Рассмотрим, как распределяются домены с южной и северной вергенцией по площади мегантиклинория (Рис. 1Г). В южной половине структуры на пространстве от г. Туапсе до г. Сочи уверенно выделяются две полосы распространения “приразломных” доменов с южной вергенцией, приуроченных к надвигам той же вергенции (“а-б” и “в-г”), то есть располагающихся вдоль простирающихся основных структур. Там же, в восточной половине Северо-Западного Кавказа могут быть намечены, кроме этого, полоса южной вергенции, приуроченная к южной части ареала среднеюрских отложений (профили 5, 7, 9) и полоса северной вергенции в северной части верхнеюрско-мелового ареала (профили 8,10). Достаточно уверенно выделяются также полоса северной вергенции в северной части ареала среднеюрских отложений (“д-е”), относительно широкая полоса южной вергенции в северных частях профилей 4, 5, 6 (“ж-з”) и расположенная непосредственно южнее, параллельная ей узкая полоса северной вергенции (“и-к”). В западной части сооружения Северо-Западного Кавказа относительно уверенно выделяются: узкая диагональная полоса южной вергенции, идущая от южной части профиля 3 к северной части профиля 5 (“л-м”) и, предположительно, две диагональные полосы северной вергенции (“о-п” и “р-с”).

Таким образом, рассмотрение механизмов складкообразования на уровне доменов по количественным замерам их геометрии обнаруживает существование в пределах Северо-Западного Кавказа протяженных наклонных зон пластического сдвига (“вязкого скола”) в качестве реального природного деформационного процесса в локальных структурах.

Механизмы основные для чехла. Традиционно главное внимание исследователей привлекали механизмы образования складчатости всего чехла. Механизм адвекции позволял на количественном уровне объяснить развитие крупных изгибов слоистости в чехле (антиклинорий или “структурных ячеек” шириной 5-10 км, IV уровень) и появление мелкой складчатости [5], но величина сокращения мелких складок оказывалась меньшей, чем реально наблюдаемая в природе. Общее горизонтальное сокращение обеспечивало нужную величину сокращения мелких складок, но этим механизмом не объяснялись крупные изгибы, поскольку не существует строгой механической модели продольного изгиба многослойных сред. Предложенная нами ранее [2] модель “адвекция плюс сокращение” объединяла на количественном уровне наиболее удачные черты геометрии этих двух моделей. Однако следует признать, что крупные изгибы – антиклинории (“структурные ячейки” в нашей терминологии) могут образовываться не только за счет механизма всплывания, но и в результате продольного изгиба. Поэтому за механизмом адвекции, обеспечивающим в модели “адвекция плюс сокращение” крупные изгибы слоистости, может скрываться продольный изгиб. В этом смысле регистрируемая в природных структурах на основе предложенной модели “адвекция” является не реальным природным процессом, а “системой отчета”, которая фиксирует величину крупного изгиба в кинематическом, а не в физическом смысле. Для прояснения этого неясного момента предлагается модель, в которой крупный изгиб, получаемый на основе “адвективной” модели, требующей растяжения слоев, пересчитывается в такое сокращение структуры, при котором слой в средней части толщи сохраняет свою длину. В предлагаемой новой модели есть и крупные и мелкие складки. Тем самым для каждого среднего сокращения мелких складок и общего сокращения чехла устанавливается минимальный крупный поворот (изгиб) слоистости, который может быть обеспечен на физическом уровне и адвекцией, и продольным изгибом. Ниже этого минимума указанные два физических механизма не могут быть отделены друг от друга путем анализа только кинематических параметров структуры. Выше этого минимума появление структуры не может быть обеспечено продольным изгибом (слоистость испытывает растяжение), и для объяснения процесса необходимо привлекать адвекцию или иной кинематически эквивалентный ей механизм. На основании вышеизложенного можно считать, что для изучения основных процессов образования складчатости на иерархическом уровне осадочного чехла требуется создание дополнительных кинематических моделей.

Выводы. Линейная складчатость и процессы складкообразования имеют определенные иерархические уровни организации, связанные с иерархией слоистости в осадочном чехле, коре и литосфере. Процедуры сравнения численных параметров геометрии природных структур с

эталонными модельными позволяют делать вполне определенные выводы о процессах на каждом иерархическом уровне или уточнять существующие модели.

#### Литература

1. Яковлев Ф.Л. Диагностика механизмов образования линейной складчатости по количественным критериям ее морфологии (на примере Большого Кавказа) М.: ОИФЗ РАН, 1997. 76с.
2. Яковлев Ф.Л. Исследование кинематики линейной складчатости (на примере Юго-Восточного Кавказа) // Геотектоника. 1987. №4. С.31-48.
3. Яковлев Ф.Л. Исследования процессов и механизмов развития пликативных деформаций в земной коре (обзор существующих методических подходов) // Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С.311-332.
4. Гиоргобиани Т.В., Закарая Д.П. Складчатая структура Северо-Западного Кавказа и механизм ее формирования. Тбилиси: Мецниереба, 1989. 61с.
5. Шолпо В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А. Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука, 1993. 192с.
6. Гончаров М.А. Инверсия плотности в земной коре и складкообразование. М.: Недра, 1979. 246с.

**Ф.Л. Яковлев, С.Л. Юнга**

*Объединенный институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта (ОИФЗ) РАН*

### **МЕХАНИЗМЫ ГОРООБРАЗОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПАМИРО-ТЯНЬ-ШАНЬСКОГО СИНТАКСИСА И АЛТАЕ-МОНГОЛЬСКОГО РЕГИОНА**

При рассмотрении механизмов горообразования исследователи исходят из двух фундаментальных фактов, относящихся к геофизике и геологии. Прежде всего, это явно изостатическая природа гипсометрического положения поверхности, что следует из статистического анализа состава коры и мантии, положения границы Мохо и положения поверхности Земли как во впадинах и на платформах, так и в горах и на высоких плоскогорьях. Вторым фактом является то, что участки коры, которые испытали значительное сокращение в недавнем прошлом, выраженное в наличии складок, надвигов и шарьяжей, являются чаще всего наиболее поднятыми. Вполне естественно, что основным механизмом горообразования считается сокращение пространства участков континентальной коры, испытывающих коллизию, при которой возникает увеличение мощности коры, особенно ее гранитного слоя (например [1]). Второй возможный механизм использует андеплейтинг как процесс наращивания коры снизу – либо в виде пододвигания пластин коры, либо перехода материала мантии в материал коры в результате фазовых переходов. Рассмотрим возможные соотношения между этими механизмами на материале региона от Индийской плиты до Байкальского рифта.

Опорным участком для наших работ послужил хорошо изученный как с геологической, так и с геофизической точки зрения район сочленения Памира и Тянь-Шаня, в котором, как считается, Индийская плита сталкивается с Евразийским континентом. Для территории Тянь-Шаня были получены направления и величины сокращения, основанные на увеличении мощности коры от “стандартного” платформенного. Используемая методика расчета (метод 1) этих деформаций включает количественный анализ вертикальных неотектонических движений и глубин залегания поверхности Мохо в ячейках координатной сетки (20'×30') по имевшейся базе данных [2]. Величина сокращения определялась увеличением мощности коры, направление сокращения выявлялось по ориентации максимальных градиентов неотектонических движений [3]. Были изучены также двадцать восемь структурных профилей, на которых прослежены разрывные и складчатые деформации поверхностей выравнивания [3]. (Рис. 1А). Материалом послужили профили как ранее опубликованные (О.К.Чедия, С.С.Шульц, И.Садыбакасов, Я.А.Беккер и др.), так и специально составленные В.Г.Николаевым [4]. Были получены величины сокращения для