

ББК 26.3
Т 31
УДК 549.903.55(1)

**Тектоника и геодинамика континентальной литосферы. Материалы XXXVI Тектонического совещания. Том 2. – М.: ГЕОС, 2003. – 336 с.
ISBN 5-89118-287-4**

Материалы совещания опубликованы при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Ответственный редактор
Ю.В.Карякин

*На обложке: впадение р Кочечум в Нижнюю Тунгуску.
Фото Д.И. Кудрявцева.*

ББК 26.3
Т 31
ISBN 5-89118-287-4

© ГИН РАН, 2003
© ГЕОС, 2003

ских валов дислокаций изменяется в широких пределах от 25 км в районе Сырьянского вала до 110 км в районе г. Советск.

Характерной чертой строения Вятской системы дислокаций являются резко выраженные флексурные элементы, соответствующие крутым крыльям валов и отвечающие на глубине краевым частям блоков фундамента или разлома. Амплитуда отдельных валов изменяется от 100 до 600 м. Амплитудность и протяженность отдельных флексур определяется характером разрывных нарушений фундамента.

В образовании Вятской системы в поперечном сечении, в различных ее частях, участвовало разное количество отдельных валов от одного до трех и более, разделенных линейными прогибами. Пространственное положение валов и их ориентировка в плане контролируются границами Кировско-Кажимского авлакогена, за исключением Иванцевско-Гавриловского вала, который в северной части имеет несколько диагональное северо-восточное простирание, не совпадающее с общим простиранием рифтогена. Северная часть вала осложнена Орлецовской и Гавриловской структурами, а южная – Иванцевской. В Гавриловской части вала, опускающейся на северо-восток в Верхнекамскую впадину, установлены широтные разрывы в породах татарского яруса, сопоставляющиеся с разломами фундамента.

Ф.Л. Яковлев¹, В.Н. Войтенко², А.К. Худолей², А.В. Маринин¹

О соотношении деформации сокращения в складчатом домене и в компетентном слое

Проблема определения величины складчатой деформации разных объемов слоистых горных пород существует по крайней мере с конца XIX в., когда при изучении Альп была обнаружена деформированная фауна, и по степени искажения ее формы были сделаны попытки оценить степень деформированности толщи в целом. Первое систематическое исследование количественных величин деформаций, во многом заложившее основы современных методов стрейн-анализа, было выполнено в 40-ых годах Э. Клоосом, изучавшим в Аппалачах деформации известняков по оолитам и криноидеям [1]. Бурное развитие методов стрейн-анализа, однако, началось лишь с 70-ых годов после ставших классическими работ Дж. Рэмзи [Ramsay 1967]. Хотя современный стрейн-анализ исходит из геометрических характеристик изучаемого объекта вне зависимости от его размера, но традиционно основные объекты стрейн-анализа изучаются в образцах или шлифах. Использование данных стрейн-анализа для определения ве-

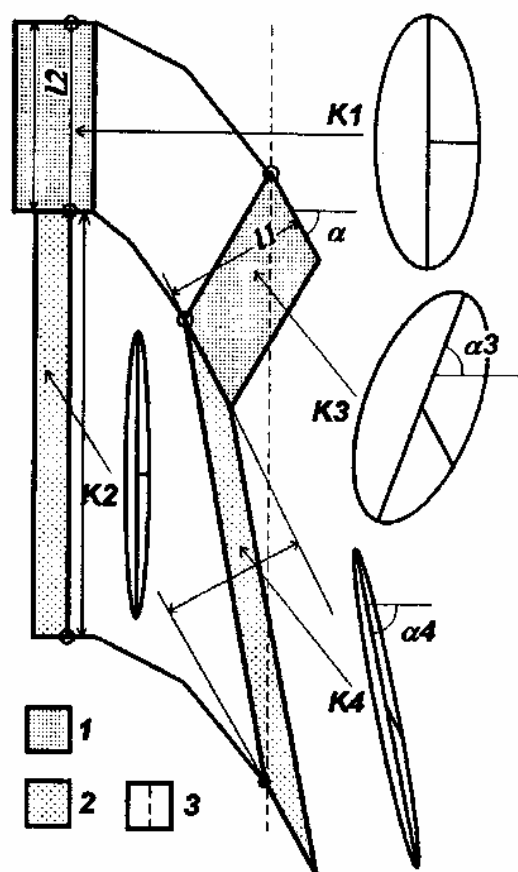
¹Объединённый институт физики Земли РАН, Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), Санкт-Петербург, Россия

личины укорочения частей структурного пересечения или всего пересечения осуществляется путем внесения поправок при построении сбалансированных разрезов [2, 3], но исследования такого рода довольно редки. Среди других методов определения сокращения в подвижных поясах основными являются палеомагнитные и использующие спутниковую геодезию.

Существующие сложности количественного определения величины сокращения при помощи существенно геометрических методов стрейн-анализа мы связываем с тем, что складчатая структура подвижных поясов имеет иерархическую организацию, в которой объекты различного масштаба могут иметь разный механизм образования и требуют специфических подходов [4]. Наиболее простой объект для исследования в этом смысле – модель складки, в которую смята толща компетентных и некомпетентных слоев.

В предлагаемой модели два слоя одинаковой мощности (компетентный и некомпетентный) образуют складку подобного типа комбинацией простых геометрических механизмов изгиба и сплющивания. В специально написанной компьютерной программе изменения геометрии слоев вычислялись циклически, при этом каждый цикл включал в себя изменения формы компетентного и некомпетентного слоев на крыле и в замке в двух стадиях, соответствующих этим простым механизмам. На крыле на стадии продольного изгиба компетентный слой испытывает поворот (наклон) без изменения нормальной мощности, в некомпетентном тот же поворот сопровождается простым сдвигом вдоль слоя (механизм поворота с перекашиванием). На стадии сплющивания все горизонтальные (перпендикулярные осевой поверхности) линии в компетентном и некомпетентном слоях на крыле и в замке испытывают определенное укорочение, а все вертикальные линии пропорционально увеличиваются. Мощность компетентного слоя в замке складки увеличивается только на этой стадии. Специально написанная компьютерная программа позволяет осуществлять циклические повторения этих вычислений с небольшими приращениями изгиба и сплющивания, моделируя их одновременное действие [4]. На рисунке приведен пример модели с изгибом (поворотом) на 1° и сплющиванием на 1% в каждом цикле для складки с одинаковой мощностью компетентного и некомпетентного слоя. Как видно из приведенных результатов вычислений, определение в действительности имеющего место общего сокращения складки по четырем цифрам сокращения в «эллипсоидах» деформации внутри слоев может вызвать затруднения. Заметим, что ключевыми здесь являются данные о величине деформации в замке и на крыле для компетентного слоя в совокупности с данными о наклоне крыла и мощностях слоя в замке и на крыле. Предлагаемую программу правильнее считать только самым первым приближением, поскольку с точки зрения механики в данной программе никак не обосновано используемое постоянное соотношение между приращениями поворота и сплющивания, которое реально должно меняться по определенным физическим закономерностям.



Модель формирования складки пачек слоев, схема, по [4].

1 – компетентный слой; 2 – некомпетентный слой; 3 – ориентировка осевой плоскости. После 44 циклов общее сокращение домена $K = - (L_f - L_0) / L_0$, составило 0.60, наклон крыла $\alpha = 61.4^\circ$, отношение мощностей «крыло/замок» $l1/l2 = 0.78$. Для компетентного слоя $K1 = 0.36$ (наклон 90°) и $K3 = 0.33$ (наклон оси $\alpha3 = -69.8^\circ$, прямой веер кливажа). Для некомпетентного слоя $K2 = 0.68$ (наклон 90°) и $K4 = 0.75$ (наклон оси $\alpha4 = 78.7^\circ$, обратный веер).

Для проверки модели (и выявленных теоретически сложностей в интерпретации данных стрейн-анализа) в мезозойских породах Северо-Западного Кавказа было исследовано несколько складок. Замерялись их геометрические параметры и отбирались образцы из замка и крыльев. Приведем результаты для верхнемеловых песчаников (складка № 20, шоссе Туапсе–Хадзыженск, 1.2 км южнее с. Ципка, карбонатно-флишевое чередование натухайской свиты верхнего турона – коньяка) и среднеюрских песчаников, окруженных аргиллитами (складка № 18, р. Пишиш, восточная окраина с. Гойтх, аален).

Из многочисленных методов количественной оценки деформации «точечных» маркёров нами был выбран метод среднего эллипса объектов – МОЕ [5], который позволяет получать корректную оценку в слабо деформированных породах, поскольку в исследуемых песчаниках ориентировка длинных осей кварцевых зерен равномерна и случайна, что является одним из основных условий применения метода. Анализ

возможностей методов R_p/ϕ , Фрая [2] и его модификаций [5] показал их заметные ограничения в данном случае, поэтому эти результаты не использовались. Для получения трехмерной модели деформации анализ МОЕ выполнялся на трех взаимно перпендикулярных друг другу плоскостях образца.

Шлифы с трех плоскостей фотографировались цифровой видеокамерой и обрабатывались при помощи компьютерных программ, в том числе и программой Instrain [5]. Построение эллипсоидов выполнялось известными способами [Shimamoto, Ikeda, 1997; Nicolas, Milton, 1980] которые были модифицированы В. Войтенко.

С использованием компьютерной программы были рассчитаны варианты модели для замеров геометрических параметров исследованных природных складок. Нами подбирались угол наклона слоя и величина отношения мощностей «крыло/замок», при этом были получены общая деформация домена и величины внутрислойной деформации. Результаты этих расчетов представлены в табл. 1, а результаты стрейн-анализа – в табл. 2. Как видно из таблиц, в самом первом приближении величины деформации «теоретической» и по анализу шлифов совпадают (0.175 и 0.131 / 0.15 и 0.13 для № 18, а также 0.102 и 0.089 / 0.10 и 0.11 для № 20). Если учесть возможные ошибки метода и то, что в природной структуре деформация не всегда является плоской, то совпадения являются очень хорошими. Для сравнения были сделаны дополнительные расчеты с изменениями величины доли сплющивания в обе стороны от лучших моделей (варианты А и Б), при которых менялось соотношение долей механизмов. При этом сильно меняются значения отношения мощностей слоя «крыло/замок» и размера внутрислойной деформации на крыле и в замке, что говорит о важности правильного количественного определения величин механизмов.

Таблица 1. Сравнение геометрических параметров природной складки с расчетными вариантами деформаций домена и внутрислойных деформаций

Структура	Параметры	18-А	18 лучш	18-Б	20-А	20 лучш	20-Б
Природная	1. Наклон крыла		85°			58°	
	2. Мощность крыла		38 мм			6.5 см	
	3. Мощность замка		45 мм			6.0 см	
	4. Отношение мощн.		0.84			Около 1.0	
Расчетная – лучшая, а также включая варианты А и Б	5. Параметры (число циклов, изг., спл.)	79; 1°; 0.20%	77; 1°; 0.25%	76; 1°; 0.30%	55; 1°; 0.15%	55; 1°; 0.20%	55; 1°; 0.25%
	6. Наклон крыла	85°	84.3°	84.6°	58.4°	58.4°	58.4°
	7. Отношение мощн.	0.86	0.83	0.81	0.955	0.94	0.929
	8. Общ. сокр. домена	0.913	0.902	0.908	0.494	0.50	0.505
	9. Стрейн в замке	0.146	0.175	0.204	0.079	0.102	0.124
	10. Стрейн на крыле	0.107	0.131	0.155	0.068	0.089	0.108
	11. Некомпетент. слой	0.956	0.950	0.953	0.717	0.717	0.717

Таблица 2. Результаты стрейн-анализа по шлифам из образцов складок 18 и 20.

Р-позиц.	№ шл.	Rxz	Ryz	$\varepsilon\sigma^*$	k	
Замок 9	18-03	1.222	1.164	0.15	0.30	Rxz, Ryz – осевые отношения построенного эллипсоида деформации, нормализованные относительно малой оси Z. $\varepsilon\sigma$ – величина полной деформации. k – параметр Флинна [$k=(R_{xy}-1)/(R_{yz}-1)$] характеризующий форму эллипсоида, отвечающего условиям деформации: $k < 1$ – деформация сплющивания – дискообразный эллипсоид, $k = 1$ – плоская деформация, $k > 1$ – деформация растяжения – сигарообразный эллипсоид. В колонке "Р": 9 и 10 – строки в таблице 1.
Крыло 10	18-02	1.197	1.096	0.13	0.96	
Замок 9	20-02	1.146	1.051	0.10	1.77	
Крыло 10	20-03	1.158	1.062	0.11	4.27	

*Величина сокращения рассчитывалась по формуле

$$\varepsilon\sigma = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$$

Выводы. А. Предлагаемая модель в самом первом приближении может давать величину сокращения пространства (перпендикулярно осевой плоскости складки в домене) достаточно корректно, что определяется хорошим совпадением расчетных величин внутрислойной деформации с их измерениями в природных складках по стандартным методам. Б. Переход к определению величины сокращения пространства от стандартных замеров внутрислойной деформации по методам стрейн-анализа требует специальных процедур, связанных с определением величин действовавших при образовании складок механизмов складкообразования.

Литература

1. Клоос Э. Деформации оолитов в складке Южных Гор, Мэриленд // Вопросы структурной геологии. М.: Иностранная литература, 1958. С. 96–156.
2. Ramsay J.G., Huber M. The Techniques of Modern Structural Geology. L.: Academic Press. V. 1: Strain Analysis. 1983. 307 p.; V. 2: Folds and Faults. 1987. P. 308–700.
3. Woodward N., Gray D., Spears D. Including strain data in balanced cross-sections. // J. Struct. Geol. 1986. V. 8, N 3/4. P. 313–324.
4. 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.
5. Erslev E.A., Ge H. Least-squares center-to center and mean object ellipse analysis // J. Struct. Geol. 1990. V. 12, No. 8. P. 1047–1059.