

на ВЮВ. На Памире в палеогене ось сжатия была направлена по линии ЮВ-СЗ. В миоцене в пределах региона и на сопредельных территориях произошла активизация тектонических движений, что обусловило наступление новейшего этапа геологического развития. Это обусловило проявление геодинамической перестройки, вследствие чего ось сжатия приобрела ориентацию на ВСВ. Дальнейшее перемещение Индостанской литосферной плиты сопровождалось устойчивым вращением ее против часовой стрелки вплоть до плейстоцена.

Таким образом, альпийская геодинамика южных частей Кавказско-Загросского и Памиро-Гималайского регионов определялась перемещением подвижных Аравийской и Индостанской литосферных плит в сторону относительно стабильной Евразии.

Интерпретация фактического материала выполнена при частичной финансовой поддержке ОНЗ РАН (фундаментальная программа № 6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов Т.П., Мухамедиев Ш.А. К реконструкции палеонапряжений по трещиноватости горных пород // Физика Земли. 1990. №2. С. 16-29.
2. Белоусов Т.П., Мухамедиев Ш.А. Трещиноватость горных пород как индикатор палеогеодинамических процессов // Исследования в области геофизики. М.: ОИФЗ РАН. 2004. С. 320-326.
3. Белоусов Т.П., Куртасов С.Ф., Мухамедиев Ш.А. Делимость земной коры и палеонапряжения в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах Земли. М.: ОИФЗ РАН, 1997. 324 с.
4. Белоусов Т.П. и др. Локализационная неустойчивость осадков (на примере северо-западного погружения Большого Кавказа) // Геофизические исследования. М.: ИФЗ РАН. 2005. Вып. 3. С. 123-126.
5. Белоусов Т.П., Куртасов С.Ф., Мухамедиев Ш.А. Новейшая геодинамика Кавказско-Загросского региона // Общие вопросы тектоники. Тектоника России. М.: Геос. 2000. С. 43-46.
6. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: МГУ. 1995. 480 с.

ГЕОМЕТРИЯ СКЛАДЧАТОСТИ И ТРЕЩИНОВАТОСТИ ВЕРХНЕМЕЛОВЫХ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

Белоусов Т.П., Мухамедиев Ш.А., Куртасов С.Ф., Грекова Т.А.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, sh_mukhamediev@inbox.ru

Исследования трещиноватости осадочных пород в складчатых областях проводятся с целью выявления особенностей зарождения трещин и связи характеристик трещиноватости (густоты и ориентационных распределений трещин) как с наблюдаемой геометрией складок, так и с предполагаемой историей их развития. Эти задачи имеют фундаментальное значение, а также представляют прикладной интерес. Действительно, их корректное решение позволит не только реконструировать геодинамическую эволюцию исследуемого региона (в том числе, и эволюцию палеонапряжений), но и правильно судить о проницаемости пород и о режимах подземных флюидодинамических процессов на основании изучения геометрии складок в районах с малым числом обнажений.

В настоящее время отмеченная проблематика находится в стадии развития, о чем свидетельствуют публикации, в которых высказываются порой резко отличающиеся суждения о взаимосвязи складчатости и трещиноватости. Трудности и неоднозначности теоретического анализа связаны с тем, что напряженное состояние в осадочных слоях сильно зависит от типа развития складки, от механизма взаимодействия между слоями при изгибе, от наличия и ориентации первичных (существовавших до складчатости) систем трещин и т.д. Реализуется продольный или поперечный изгиб, существует или отсутствует проскальзывание между слоями – эти и другие факторы, осложненные многовариантностью сценариев кинематического развития складки и наличием различных критериев трещинообразования, приводят к предсказанию многих типов систем трещин и разной очередности их возникновения. Так, опираясь лишь на представления теории изгиба тонких пластин, в зависимости от ориентации главных осей напряжений в слое можно прогнозировать возможность образования 5-ти разных картин разрушения, в которых суммарно участвуют 11 различных систем трещин (как сдвиговых, так и отрывных) [1]. Если вместо прочностных критериев возникновения трещин использовать геометрические критерии, сформулированные в терминах характеристик кривизны изгибаемой поверхности (например, в терминах гауссовой и средней кривизны [2] или направления минимальной кривизны [3]), то результаты прогноза трещинообразования изменятся.

Представляется, что одним из возможных подходов к решению проблемы является детальное изучение трещиноватости для отдельных складок и последующее сопоставление результатов для разных регионов с целью выявления универсальных закономерностей. В рамках намеченной программы мы в течение нескольких

полевых сезонов изучали трещиноватость мезозойско-кайнозойских осадочных горных пород на территории северо-западного замыкания Большого Кавказа. Северо-Западный Кавказ в новейшем структурном плане представляет собой антиклиналь с относительно плоской сводовой частью и крутыми крыльями, обращенными к Черноморской впадине и Индоло-Кубанскому предгорному прогибу. Замыкание Северо-Западного Кавказа осуществляется поперечными ступенями, разделенными флексурно-разрывными зонами [4, 5]. Район тектонофизических исследований располагается в пределах Новороссийской ступени. При обследовании ее южного крыла в районе пос. Кабардинка нами была изучена система обнажений верхнемеловых отложений, представленных известняками, мергелями и глинами (рис. 1). Обнажения простираются в ЮВ направлении более чем на 20 км вдоль автодороги Новороссийск-Геленджик. Пласты осадочных пород под углами в $50-70^\circ$ падают на юго-запад в сторону автодороги, азимуты простираций пород – $290-305^\circ$. Пласты денудированы на разные глубины, поэтому их внешний облик представляет собой как бы раскрытую книгу, у которой сдвинуты страницы.



Рис. 1. Фрагмент обнажения осадочных пород вдоль автодороги Новороссийск-Геленджик

Замеры трещин производились в 48 точках наблюдения (ТН), расположенных в пределах $37.8759-37.9261^\circ$ в.д. Замеры, компьютерная обработка данных и их интерпретация производились согласно разработанной нами методике [6]. В каждой ТН замерялись элементы залегания (азимут и угол падения) плоскостей 100 трещин, строилась стереограмма полюсов нормалей к плоскостям трещин, максимумы полюсной плотности (при выполнении некоторых статистических критериев [7]) интерпретировались как маркирующие системы трещин с соответствующим залеганием.

Изучение трещин показало, что подавляющее их число субортогонально слоистости пород. Этим свойством обладают все системные трещины без исключения. Генерализованная геометрия трещиноватости выявляется при обработке и интерпретации всей совокупности 4800 трещин, замеренных в исследуемом районе. На рис. 2 а представлено среднее ориентационное распределение трещин (ОРТ), построенное после приведения слоев к первоначальному горизонтальному положению. На стереограмме отчетливо проявляются максимумы полюсной плотности (кружки), соответствующие трем системам трещин: продольной системе L , простирающейся параллельно крылу складки, и двум системам C' и C'' , плоскости которых составляют между собой острый двугранный угол, $\angle C'C'' \approx 45^\circ$. Биссектриса этого угла практически имеет то же направление, что и средняя нормаль к простираению крыла складки. На рис. 2 б обобщенная взаимосвязь геометрии трещин и складки представлена другим способом. Локальные системы трещин (общим числом 120), выделенные по всем 48 ТН, были разбиты на 18 групп по признаку принадлежности их азимутов тому или иному 10-градусному интервалу. Кривая изменения относительного числа систем в каждой группе на рис. 2 б сопоставлена с гистограммой локальных азимутов простираения и падения слоев горных пород. Системы L , C' , C'' проявляются вновь.

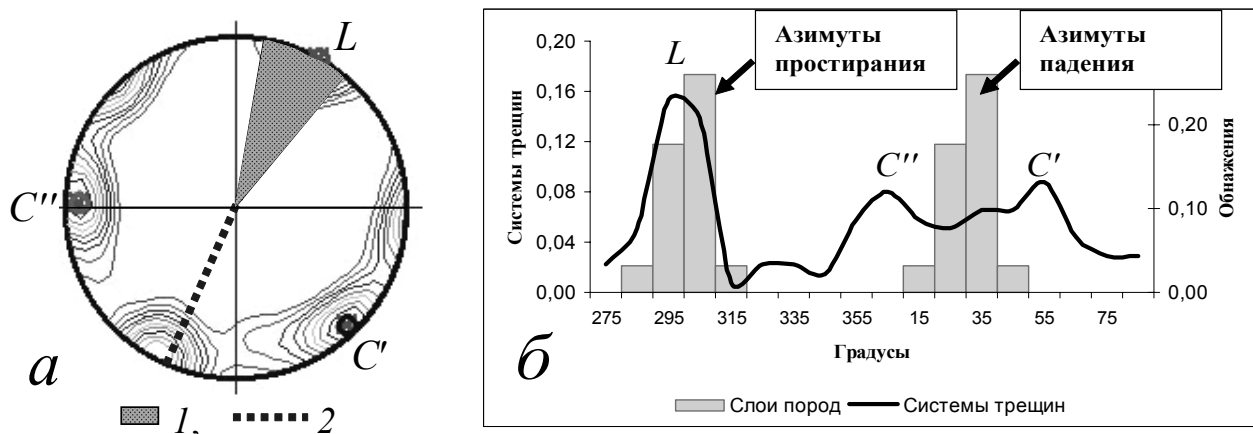


Рис. 2. Обобщенные характеристики геометрии складки и трещиноватости по всем 48 ТН.

a – стереограмма полусферической плотности 4800 трещин; 1 – разброс азимутов падения пластов; 2 – простирание биссектрисы угла между максимумами, соответствующими системам трещин C' и C'' ; *б* – частота наблюдения азимутов простирания слоев и систем трещин (осреднение по интервалам 10°)

Для выявления более тонких особенностей геометрии складки и систем трещин следует анализировать локальные геометрические характеристики. Зависимость локального простирания осадочных слоев от расстояния вдоль оси складки, представленная на рис. 3, имеет наклонную линию тренда, указывающую на то, что складка на изученном участке является дугообразной в плане, с выпуклостью, ориентированной на юго-запад. Результаты анализа показывают также, что у локальных отклонений азимутов простираний отсутствует корреляция с выявленной дугообразной кривой ($R^2=0$).

Для анализа взаимосвязи геометрии складки и трещиноватости были выделены 39 ТН, в которых ориентация локальных систем L не отличалась более чем на $\pm 10^\circ$ от локального простирания слоистости. Взаимосвязь соответствующих азимутов отражена на рис. 4. Результаты линейного регрессионного анализа, приведенные на этом рисунке, выявляют достаточно высокую степень корреляции. Сравнение ориентации локальных систем L с генерализованным дугообразным простиранием складки показывает, что в этом случае корреляция существенно слабее ($R^2=0.36$ вместо $R^2=0.56$ на рис. 4). Тем не менее, если всем локальным системам L придать однородную ориентацию, то дугообразная складка «спрямляется». При проведении такой процедуры азимут простирания «спрямленной» складки практически совпадает с азимутом простирания параллельных систем L .

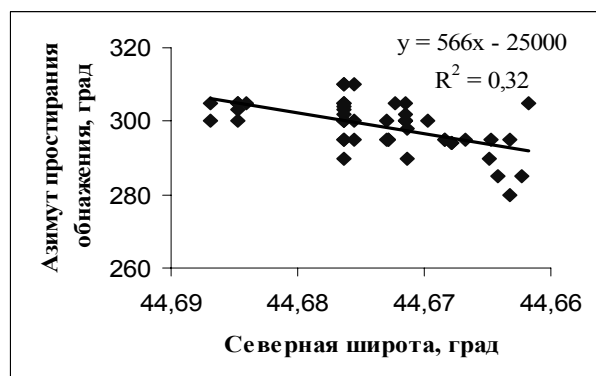


Рис. 3. Изменение локальных простираний пластов с расстоянием (48 ТН)

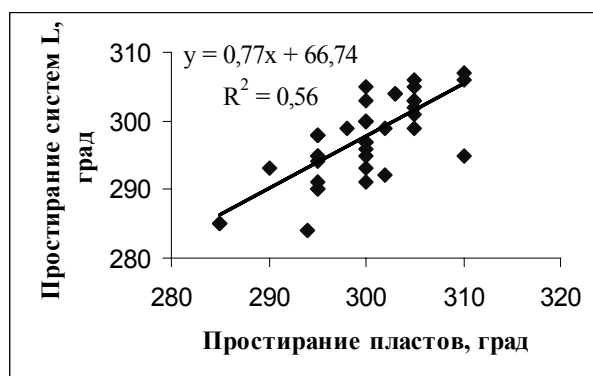


Рис. 4. Корреляция простирания систем L с локальными простираниями слоев (39 ТН)

Нами проведено и сравнение простирания складки с ориентацией систем C' и C'' . Были выделены 26 ТН, в которых пара систем C' , C'' выявляется надежно и в которых $\angle C'C''$ принимает значения от 30° до 45° . В этих ТН модуль отклонения биссектрисы $\angle C'C''$ от локальных азимутов падения пластов изменяется от 0° до 14° . Выявлено, что корреляция локальных азимутов биссектрисы и падения пластов несколько слабее ($R^2=0.26$), чем соответствующая корреляция для азимутов простирания систем L и слоев ($R^2=0.56$, рис. 4). Тем не менее, наличие взаимосвязи не вызывает сомнения.

Упомянутые выше исследования позволяют сделать следующие выводы. Изученный участок Северо-Западного Кавказа, который ограничен с севера и юга широтами 44.6869°N и 44.6617°N, представляет собой юго-западное крыло дугообразной в плане складки верхнемеловых осадочных пород. Складка ориентирована своей выпуклостью на юго-запад, а генерализованное дугообразное простираие ее крыла осложнено высокочастотной составляющей. На обнажениях участка наиболее четко выражены 3 системы трещин, ортогональные слоистости пород: продольная по отношению к оси складки система L , и две системы C' и C'' , чаще образующие между собой острый угол $\angle C'C'' \approx 30-45^\circ$. Как в среднем ОРТ, так и во многих локальных ОРТ, ориентации систем L , C' , C'' взаимосвязаны, а именно: система L делит пополам тупой угол между системами C' и C'' . Эта конфигурация систем трещин взаимосвязана с простираием складки: система L параллельна, а биссектриса острого угла $\angle C'C''$ – перпендикулярна простираию складки. Отмеченная закономерность проявляется как в среднем для изученного участка складки, так и для многих ТН.

На основе выявленных закономерностей можно предположить следующую схему эволюции складки и образования систем трещин. Складка зародилась как прямолинейная, причем перпендикулярно действующему в тот момент максимальному горизонтальному сжимающему напряжению T_{max} (напряжения сжатия считаем положительными). В дальнейшем, при росте складки и, соответственно, при увеличении по абсолютной величине ее кривизны в вертикальном сечении главное сжимающее напряжение T_d , действующее по падению складки и равное в начальный момент величине T_{max} , начало уменьшаться, пока не сравнялось с горизонтальным напряжением T_s , действующим по простираию складки. Напряжение T_s является сжимающим в силу стеснения деформаций вдоль оси складки. При дальнейшем росте складки разность $T_s - T_d$ увеличивалась, что могло привести к латеральному изгибу складки в юго-западном направлении. Еще позже возникла вторая форма потери устойчивости, выразившаяся в появлении высокочастотной поверхностной моды изгиба на крыле складки. Системы трещин L , C' , C'' возникли заведомо до того, как проявились отмеченные формы потери устойчивости, т.к., будучи «вмороженными» в материал, системы следили за кинематикой перемещений, сопровождавших процессы неустойчивости. Система L возникла не ранее систем C' и C'' . Вопрос о том, не сформировались ли обсуждаемые системы трещин до начала складкообразования, остается открытым.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и фундаментальной программы № 6 ОНЗ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bergbauer S., Pollard D.D. A new conceptual fold-fracture model including prefolding joints, based on the Emigrant Gap anticline, Wyoming // GSA Bulletin. 2004. V. 116. P. 294-307.
2. Lisle R.J. Detection of zones of abnormal strains in structures using Gaussian curvature analysis // AAPG Bulletin. 1994. V. 78. P. 1811-1819.
3. Fischer M.P., Wilkerson M.S. Predicting the orientation of joints from fold shape: results of pseudo-three-dimensional modeling and curvature analysis // Geology. 2000. V. 28. P. 15-18.
4. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра. 1968. 483 с.
5. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Научный мир. 2001. 606 с.
6. Белоусов Т.П., Куртасов С.Ф., Мухамедиев Ш.А. Делимость земной коры и палеонапряжения в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах Земли. М.: ОИФЗ РАН. 1997. 320 с.
7. Belousov T.P., Mukhamediev Sh.A., Kurtasov S.F. Joint orientations from Paleozoic sedimentary rocks in the Kyzyl Kum region, Uzbekistan, Central Asia // Russian Journal of Earth Sciences. 2001. V. 3. № 5. P. 333-351. Available at: <http://rjes.wdcb.ru/>.

СЕЗОННЫЕ И ВЕКОВЫЕ ВАРИАЦИИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СУТОК И ВАРИАЦИИ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

Благовещенская Е.Э.

¹ СПбФ ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, jlyskova@mail.ru

Появление в середине прошлого века сначала кварцевых, а затем еще более точных атомных часов позволило астрономам уверенно проследивать неравномерности вращения Земли не только в вековом масштабе времени, но и в пределах года. Многолетние уже спутниковые данные о фактическом гравитационном поле Земли показывают, что коэффициент J_2 , описывающий экваториальное вздутие (или, что, по сути, тоже самое, осевое полярное сжатие), имеет устойчивые сезонные вариации. Эти вариации чаще всего предположительно объясняют сезонным перераспределением воздушных масс. Однако, учитывая, что экваториальное вздутие в геологическом масштабе времени определяется скоростью вращения Земли ω и упруго-пластическими деформациями ее твердых оболо-