

ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ПОМОЩИ ВЕЙВЛЕТОВ**Белашев Б.З.¹, Екимова И.А.², Нилов М.Ю.¹**¹Институт геологии Карельского НЦ РАН, г. Петрозаводск, belashev@krc.karelia.ru²Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск.

Традиционным элементом обработки геофизических данных является выделение моментов времени поступления сигналов на детектор. Как правило, эти моменты позволяют локализовать источник сигнала в пространстве и времени. Быстрая и надежная локализация событий приобретает важное значение в технологии сейсмического мониторинга. Перекрывание сейсмических сигналов, нестационарный характер, высокий уровень шума затрудняют обработку данных, а ее низкое быстродействие связывают с ручными действиями интерпретатора сейсмограмм, выделяющего моменты поступления на приемник разных типов сейсмических волн. Автоматизация таких ручных процедур представляется малоэффективной.

В работе представлены алгоритмы, фиксирующие на основе стандартных интегральных характеристик и преобразований особенности сейсмограмм, сопоставляемые моментам времени поступления упругих волн на сейсмоприемник.

Моделированием показано, что вейвлеты «Wavelet Toolbox» системы компьютерной математики «Matlab», фильтруют шум, реагируют на изменение спектрального состава и скачки непрерывности сигнала. Благодаря этим свойствам они способны выявлять зоны наложения компонент сигналов. Чувствительны к особенностям сигналов оказались энтропия, дисперсия, фактор нестационарности, рассматриваемые как характеристики окна, сканирующего данные.

Вейвлет алгоритмы применены для обработки сейсмограмм, регистрируемых сейсмическими станциями Карелии. Их данные сравнены с данными программы WSG, использующей ручную расстановку фаз вступления сейсмических волн. Результаты сравнения свидетельствуют о способности вейвлет алгоритмов давать детальную картину сейсмического процесса. Их целесообразно применять для близких сейсмических событий, например, промышленных взрывов, координаты и время которых помогают уточнить локальные скоростные модели земной коры.

Областью, где применение вейвлет алгоритма также может оказаться эффективным, является профилирование при помощи георадара. Как аналог радиолокатора, георадар содержит антенну, излучающую видео импульс вглубь земной поверхности, антенну, принимающую отражения, блок обработки и представления данных. Форма видео импульса, обычно соответствующая 1.5 периода синусоиды с длиной волны 0.3-1.0 м, определяет глубину проникновения импульса и пространственное разрешение, связанные противоположным образом. Из-за дисперсии среды и изменения знака сигнала при отражении, форма регистрируемых сигналов часто отличается от исходной и оказывается малоинформативной.

Данные георадарного профилирования необходимо интерпретировать. Обычно отражения сопоставляют локальным максимумам сигналов. Из-за наложения и перекрывания отраженных сигналов такой подход не всегда соответствует реальности. Вейвлет алгоритм точнее выявляет границы компонент сигнала и положения отражающих неоднородностей.

Для апробации алгоритма использованы данные профилирования торфяного болота у п.Лоймола Суоярвского района Карелии, полученные георадаром ОКО-2 по 273 трассам. База георадара составляла 930 мм, центральная частота – 150 МГц, диапазон излучаемых частот – 0-320 МГц, расстояние между трассами – 200 мм, время регистрации трассы – 400 нс.

Вейвлет алгоритм улучшает пространственным разрешением, выявляет особенности слабых сигналов, позволяет использовать импульсы низких частот для расширения диапазона сканирования по глубине.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 08-01-98804 p_a).

**АЛЬПИЙСКАЯ ГЕОДИНАМИКА ЦЕНТРАЛЬНЫХ ЧАСТЕЙ
ЗАГРОССКОЙ И ГИМАЛАЙСКОЙ СКЛАДЧАТЫХ СИСТЕМ****Белоусов Т.П.**

Институт физики Земли РАН, г. Москва, belousov@ifz.ru

В пределах центральных частей Загросской и Гималайской складчатых систем геодинамические исследования проводились нами по теме «Изучение трещиноватости горных пород и напряженного состояния земной коры активных регионов Земли». Основной задачей полевых работ являлся сбор данных по внутрислойной трещиноватости осадочных горных пород.

1. На территории Загроса в процессе полевых исследований были собраны данные по трещиноватости осадочных пород в более чем 270 обнажениях. Обследованию подвергались отложения от юрского до голоценового возрастов. В каждой точке наблюдения (ТН) устанавливалось около десяти параметров, наиболее важными из которых являлись азимуты и углы падения плоскостей 100 трещин.

В возрастном отношении на мезозойские (Mz) осадочные породы приходится 23 ТН. Они распределились следующим образом: поздняя юра (J_3) – 3 ТН; ранний мел (K_1) – 8 ТН; поздний мел (K_2) – 12 ТН. Трещиноватость кайнозойской (Kz) осадочной толщи изучена более детально. На нее приходится 249 ТН, которые распределились: палеоген (Pg) – 41 ТН: Pg₁₋₂ – 9 ТН, Pg₃ – 32 ТН; неоген (N) – 187 ТН: N₁¹ (Гачсаран) – 22 ТН, N₁² (Мишан) – 43 ТН, N₁³ – N₂¹ (Агаджари) – 43 ТН, N₂¹ (Лакхари) – 26 ТН; N₂² (Бахтиари) – 53 ТН; четвертичный период (Q) – 21 ТН: Q₁₋₃ (Плейстоцен) – 9 ТН, Q₄ (Голоцен) – 12 ТН. Из литологических разновидностей в составе обследованных осадочных образований преобладают известняки и известняки-ракушечники – (119 ТН), песчаники – (109 ТН). На другие горные породы (от тонкозернистых до грубообломочных) приходится около 40 точек наблюдения.

Реконструкция напряженно-деформированного состояния осадочного слоя земной коры региона проводилась нами на основе анализа рисунка внутрислойной трещиноватости горных пород позднего мезозоя и кайнозоя [1-4]. В пределах рассматриваемой территории осадочные образования этого возраста развиты практически повсеместно. В пределах Внешней зоны Юго-Восточного Загроса наиболее широко и полно обнажены горные породы неогена. В связи с этим трещиноватость пород данного возраста изучена нами наиболее детально (187 ТН). Вдоль юго-западной периферии Внешней зоны неогеновые породы перекрыты четвертичными отложениями, трещиноватость которых изучена нами в 21 ТН.

Обработка данных по стереограммам распределения трещиноватости горных пород и реконструкция палеонапряжений осадочного слоя земной коры центральной части Загроса показали, что на границе юры и мела изучаемая территория находилась под воздействием сжатия, ось которого была ориентирована по линии ВСВ-ЗЮЗ. Это направление оси максимального сжатия устойчиво сохранялось в палеогене и в гачсаранское время раннего миоцена.

В среднем миоцене, в период формирования отложений формации Мишан, произошла кратковременная переориентация оси максимального сжатия. Обработка стереограмм распределения трещиноватости осадочных горных пород показала, что для этого периода нет однозначного решения напряженного состояния. По одному из вариантов ось максимального сжатия отклонилась почти на 90°, приобретая направление по линии ССЗ-ЮЮВ. По другому варианту она отклонилась не более чем на 30° к ССВ-ЮЮЗ и не на всей территории, а лишь в ее южной части. При этом азимуты простираций оси сжатия в разных точках наблюдения варьируют в широких пределах от 5 до 85°. Об этом свидетельствуют стереограммы плотностей полюсов нормалей к трещинам, развитым в породах формации Мишан [5].

Анализ рисунка трещиноватости в породах формации Агаджари позднего миоцена-раннего плиоцена в 43 ТН позволил установить, что на этом отрезке времени ось максимального сжатия в пределах Внешней зоны Юго-

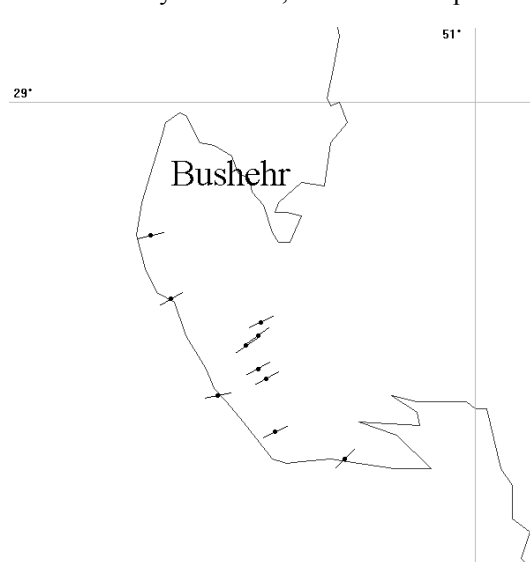


Рис. 1. Ориентация оси сжатия поля напряжений, реконструированного по внутрислойной трещиноватости четвертичных осадочных пород полуострова Бушер Внешней зоны Юго-Восточного Загроса

Восточного Загроса вновь претерпела переориентировку и приобрела направление по линии СВ-ЮЗ. Азимуты ее расположения варьируют от 30° до 80°, но чаще всего они близки к 45°-50°. Близко к этому простираению была ориентирована ось максимального сжатия в плиоцене. Анализ рисунка трещиноватости осадочных пород формаций Лакхари и Бахтиари показал, что ось максимального сжатия в период их формирования располагалась по-видимому по линии СВ-ЮЗ.

О характере напряженного состояния осадочного слоя земной коры на четвертичном этапе развития, характеризующемся активным проявлением восходящих тектонических движений, позволяют судить результаты тектонофизической реконструкции для 21 ТН. Они свидетельствуют, что ось максимального сжатия во Внешней зоне Юго-Восточного Загроса в плейстоцене, как и в плиоцене была ориентирована по линии СВ-ЮЗ (рис. 1). Однако в голоцене она несколько отклонилась и приобрела простираение по линии ВСВ-ЗЮЗ.

2. На севере Центральных Гималаев и юге Западного Тибета в процессе полевых исследований рисунок трещиноватости горных пород изучен нами рекогносцировочно в 35 ТН. Из них 27 ТН приходится на осадочные породы мезозойско-кайнозойского (Mz-Kz) возраста, в 6 ТН исследована трещиноватость метаморфических пород архея (Ar) и протерозоя (Pr), по одной точке наблюдения заложены в палеозойских (Pz) песчаниках и ме-



Рис. 2. Веерообразная трещиноватость верхнемеловых песчаников зоны сочленения Гималаев и Тибета

других систем варьируют в зависимости от местонахождения осадочных пород в пределах зоны сочленения Гималаев с Тибетом. По направлениям эти системы весьма близки к трещинам в архейских и протерозойских породах. Из этого можно сделать заключение, что трещиноватость изученной территории, несмотря на высокую неотектоническую активность региона, является упорядоченной.

На основе анализа первичной трещиноватости Mz-Kz осадочных пород проведена реконструкция палеонапряжений и установлены основные закономерности альпийской геодинамики южной части Памиро-Гималайского региона. Они заключаются в следующем:

В юрское время согласно данным наших палеорекопструкций ось максимального сжатия на севере Центральных Гималаев и юге Западного Тибета была ориентирована на ССЗ (340-355°). В начале мела ось максимального сжатия претерпела переориентировку на ССВ-ВЗВ (20-70°). В палеогене ось сжатия приобрела направление на ВЮВ (100-110°). На Памире в палеогене ось сжатия была направлена по линии ЮВ-СЗ. В миоцене в пределах региона и на сопредельных территориях проявилась геодинамическая перестройка, вследствие чего ось сжатия приобрела ориентацию на ВЗВ (55-60°). Дальнейшее развитие региона в плиоцене и плейстоцене сопровождалось устойчивым вращением оси сжатия поля палеонапряжений против часовой стрелки.

Можно предполагать, что альпийская геодинамика севера Центральных Гималаев и юга Западного Тибета определялась перемещением в сторону Евразии Индостана, претерпевающим устойчивое вращение. При этом с юры по палеоген вращение протекало по часовой стрелке (J 340-350°; K 20-70°; Pg 100-110°), а с палеогена по плейстоцен – против (Pg 100-110°; N1 55-60°; N2 35° Q 25-30°).

Примерно такие же, как в плейстоцене, направления векторов горизонтальных смещений геодезических пунктов по данным GPS-измерений на юге Тибета показаны в работах E. Calais et al. [2006] и Wayne Thatcher [2007].

3. Согласно современным тектоническим представлениям [6] в конце средней юры Земля вступила в поздне-мезозойско-кайнозойский этап развития, приведший к распаду Пангеи, образованию молодых океанов и формированию их современной структуры. В начале этого процесса произошло заложение широтной части Центральной Атлантики и восстановление субширотного океанского пространства, разделявшего ранее Гондвану и Лавразию. Ось максимального сжатия в районе Центральных Гималаев, юге Западного Тибета и на Памире в юрское время была ориентирована на ССЗ. В конце юры-начале мела началось формирование субмеридионального участка Атлантического и северной части Индийского океанов. Это привело к сокращению Тетиса и сближению подвижных Индостанской и Аравийской литосферных плит с относительно стабильной Евразией.

Территория Загроса под воздействием перемещения Аравийской плиты, особенно центральная часть его Внешней зоны в конце мезозоя и на протяжении большей части кайнозоя формировалась под влиянием поля палеонапряжений с осью максимального сжатия близкой по простиранию к СВ-ЮЗ. Лишь в среднем миоцене она претерпела кратковременную перестройку, отклонившись от этого направления. Со второй половины миоцена, в плиоцене и плейстоцене, ось максимального сжатия вновь простиралась по линии близкой к СВ-ЮЗ. Однако в голоцене она приобретает простирание по линии ВЗВ-ЗЮЗ.

Перемещение Индостанской плиты в северном направлении сопровождалось вращением ее по часовой стрелке. Под ее давлением в начале мела ось максимального сжатия в регионе переориентировалась с ССЗ на ССВ. Вращение Индостанской плиты продолжалось и в палеогене, вследствие чего ось сжатия приобрела направление

ловых (К) гранитах. Изученные Mz-Kz отложения в возрастном отношении распределились: юра (J) – 3 ТН, мел (К) – 9 ТН, палеоген (Pg) – 3 ТН, миоцен (N₁) – 3 ТН, плиоцен (N₂) – 3 ТН, плейстоцен (Q) – 6 ТН.

В 27 ТН Mz-Kz осадочных пород региона выявлены три системы трещин. На северо-западе от горы Кайлас в 10 ТН, заложенных в этих породах, выражены системы трещин с простираниями 40-80, 280-300 и 340-360. В районе Кайласа изучена трещиноватость меловых осадочных пород (рис. 2). Она также определяется тремя системами, направленными на 75-80, 280-300 и 325-335. Одна из систем, как и в протерозойских образованиях, при перемещении с востока на запад меняет свое простирание с СЗ (325-335) на ССЗ (340-360). Примерно такой же рисунок трещиноватости присущ Mz-Kz осадочным породам, окаймляющим озеро Манасаровар. Таким образом, в Mz-Kz породах региона наиболее устойчиво выражена система с трещинами, ориентированными на 280-300. Направления

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