

УДК 551.243 (262.5)

Н.В. Шафранская<sup>1</sup>

## МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИАГРАММ В СТРУКТУРНО-ПАРАГЕНЕТИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ (НА ПРИМЕРЕ ВАЛА АНДРУСОВА ЧЕРНОМОРСКОЙ ВПАДИНЫ)

*Описаны оригинальные методики построения диаграмм простира-  
ния разломов, которые используются в структурно-парагенетическом  
анализе картографических материалов региональных геологических объек-  
тов. Построения проиллюстрированы на примере вала Андрусова Черно-  
го моря, включая интерпретацию построенных диаграмм.*

### Введение

Сдвиговые разрывные нарушения в широком их геологическом по-  
нимании как физических сдвигов являются наиболее распространенны-  
ми структурными элементами земной коры по сравнению с представите-  
лями других генетических групп дизъюнктивов. Всевозможные по масш-  
штабам проявления — от мелких сдвиговых дислокаций до крупных слож-  
нопостроенных сдвиговых зон — сдвиги играют существенную роль в тек-  
тонике земной коры. На господствующее развитие сдвигов одними из  
первых обратили внимание А.В. Пейве [12], Дж. Муди и М. Хилл [8],  
В.Н. Павлинов [9], Д. Уилсон [25] и др.

При характеристике тех или иных разломов и разломных зон в ра-  
ботах по Черноморскому региону отмечалась, как правило, и сдвиговая  
компонента [10, 4]. В последних исследованиях ОМГОР НАНУ уделено  
специальное внимание определяющей роли региональных сдвигов в фор-  
мировании приразломных структур [4]. Публикации, посвященные де-  
тальному исследованию структур Черноморского бассейна, предполага-  
ются в виде серии, поэтому в отдельной статье целесообразно привести  
системное изложение взаимосвязанных вопросов методики структурно-  
парагенетического анализа и интерпретации сдвиговой тектоники.

### Сдвиговая тектоника и структурно-парагенетический анализ

В разрывных нарушениях (разломах) с комбинированной кинемати-  
ческой характеристикой всегда присутствует сдвиговая компонента. Вне  
зависимости от амплитуды сдвиговых дислокаций основного разлома, даже  
— минимальной, сдвиговая деформация в зоне его влияния может обра-  
зовывать закономерно ориентированные совокупности вторичных, пре-  
имущественно разломных, а иногда и складчатых структур.

©Н.В. Шафранская

<sup>1</sup> ОМГОР ННПМ НАН Украины

Выявлению такого рода соотношений основных и вторичных структур и предназначается структурно-парагенетический анализ, использованный здесь в методологических рамках сдвиговой тектоники.

Анализ результатов многочисленных экспериментов [20, 15, 2, 7, 5, 18, 23, 24, 22 и др.] позволяет проследить процесс формирования сдвиговой зоны от начала деформации сдвигания до появления непрерывного разрывного шва. Деформация в начальную стадию является однородной. При нарастании амплитуды смещения в пределах сдвиговой зоны поле деформаций становится все более неоднородным, и в деформируемом материале появляются трещинно-складчатые структуры (остаточные деформации или дислокации) различной ориентировки. Процесс деформации зависит от способности среды структурообразования к пластическим деформациям (дислокациям). В пластичных породах обычно появляются складки в виде эшелона ( $F_d$ ), образующие с направлением сдвиговой зоны угол в  $20-45^\circ$ . При деформации хрупких пород складки находятся в угнетенном состоянии. Отчетливо выражена система трещин растяжения (или трещин скола с постоянной тенденцией к растяжению), образующих вдоль сдвиговой зоны эшелон  $R$  или  $T$ . В ряде опытов были получены одновременно эшелонированные трещины растяжения и складки (рис. 1, 2).

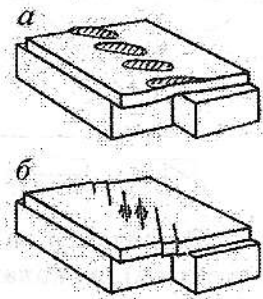


Рис. 1. Формы проявления на поверхности сдвигов в глубинном фундаменте [20].  
а – ряд кулисообразных брахискладок, б – ряд унаследованных кулисообразных сдвигов.

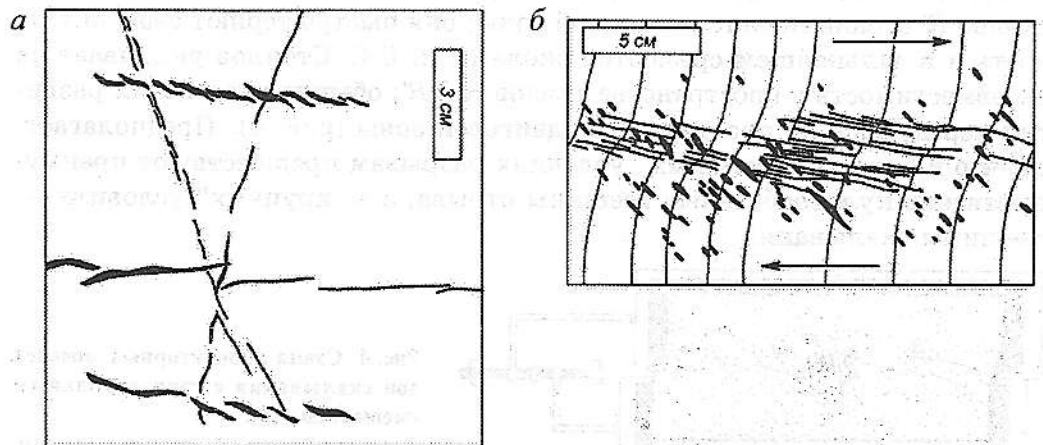


Рис. 2. Ряды кулисообразных трещин, предшествующих образованию разрыва [20].  
а – наблюдавшиеся на поверхности песчаного слоя в долине ручья Лапшанка в Предкарпатье; б – полученные экспериментально во влажной глине.

Однако в сдвиговых зонах возникают и другие дизъюнктивные нарушения — главным образом сколы, которые зачастую остаются “сухими” трещинами. Эту группу сколов определяют преимущественно двумя системами трещин —  $R$  и  $R'$  (известны как сдвиги Риделя) [22]. Сколы  $R$  и  $R'$  (унаследованные сдвиги — по Ярошевскому [20]), возникающие одновременно или даже несколько ранее складок и трещин растяжения, являются сопряженной системой. Если угол между сопряженными поверхностями сдвигов и осью  $s_1$  (угол сдвига) обозначим через  $\theta$  и примем, что его средняя величина равна  $30^\circ$ , то ориентировка потенциальных сдвигов будет определяться углами (рис. 3):

$$\beta_1 \geq (45^\circ - \theta = 15^\circ)$$

$$\beta_2 \geq (45^\circ + \theta = 75^\circ)$$

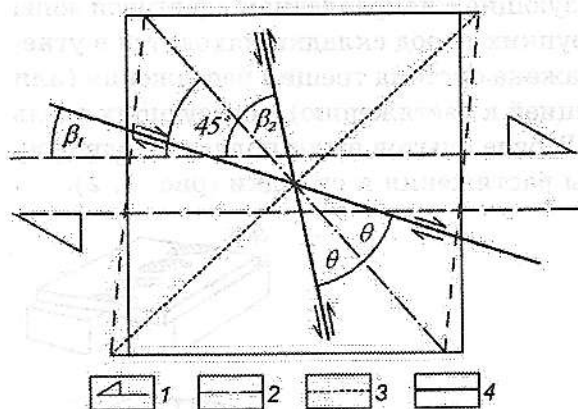


Рис. 3. Схема ориентировки трещин, унаследованных по отношению к сдвиговому перемещению в фундаменте, в условиях простого сдвига, при типичном угле сдвига  $\theta=30^\circ$  [20].

1 — проекция зоны сдвигового перемещения в фундаменте на поверхность и направление по этой зоне (вызывающего в вышележащих породах преобразование условного квадрата в ромб), 2 — ось напряжения  $\sigma_1$ , 3 — ось напряжения  $\sigma_3$ , 4 — поверхности унаследованных разрывов (сдвигов).

В сколах  $R$  знак сдвигания такой же, как и всей зоны (синтетические сколы), в сколах  $R'$  — он обратный (антитетические сколы). Сколы  $R$  и  $R'$  возникают статистически одновременно: первые имеют большие длину и амплитуду смещения, вторые — преобладают количественно. Длина сколов  $R'$  ограничивается шириной зоны; они быстро теряют свою активность и в дальнейшем срезаются сколами  $R$ . С.С. Стоянов указывает на несовместимость в пространстве сколов  $R$  и  $R'$ ; обычно участки их развития чередуются по простиранию сдвиговой зоны (рис. 4). Предполагается, что в более “податливых” условиях разрывам предшествуют преимущественно кулисообразные трещины отрыва, а в “хрупких” условиях — трещины скалывания.

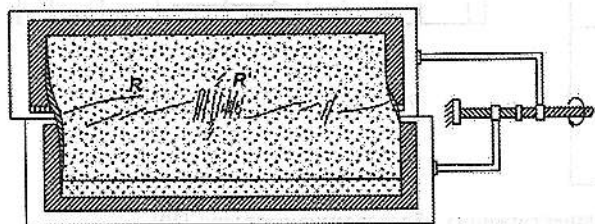


Рис. 4. Схема лабораторных моделей зон скалывания с горизонтальным смещением [15].

$R$  — сколы Риделя,  $R'$  — сопряженные сколы Риделя.

А. Скемптон [23] в качестве поздних структур зон скалывания выделил еще две группы — обратные косые нарушения  $P$  и продольные

сколы  $L$ . Появление магистрального сдвигового шва, разделяющего сдвиговую зону на две половины, вызвано в первую очередь слиянием сколов  $R$ , обратных косых нарушений  $P$  и продольных сколов  $L$ . Если продольные сколы  $L$  обуславливают общую прямолинейность магистрального разрыва, то сколы  $R$  и обратные косые нарушения  $P$  — локальную извилистость [1]. После появления магистрального шва диагональные трещины растяжения  $T$ , субпоперечные сколы  $R'$ , часть сколов  $R$  и складки  $F_d$  становятся оперением этого шва (рис. 5).

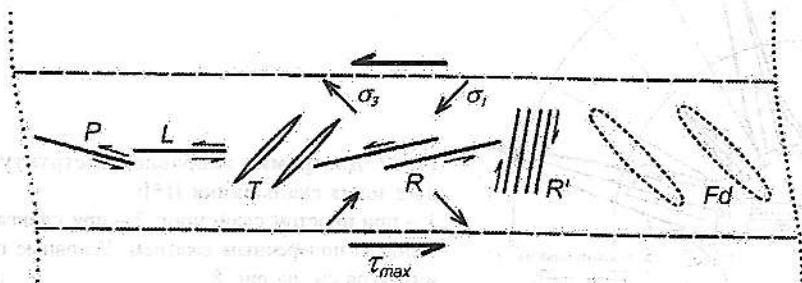


Рис. 5. Схема напряжений и структур в зонах скальвания [15].

Условные обозначения:  $F_d$  — эшелонированные складки;  $R$  и  $R'$  — сопряженные трещины скола;  $T$  — эшелонированные трещины растяжения;  $L$  — продольные сколы;  $P$  — обратные косые сколы;  $\sigma$  — направления напряжений:  $\sigma_1$  — сжатия;  $\sigma_3$  — растяжения;  $\tau$  — напряжение скальвания.

Кроме упомянутых выше, выделяется еще шесть групп вторичных разрывов, образующихся у окончания сдвига:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$  (рис. 6), что характерно для изотропных моделей. В природных же парагенезисах они могут наблюдаться либо в виде полного спектра направлений структур, либо в редуцированном, фрагментарном виде в зависимости от степени неоднородности геологической среды.

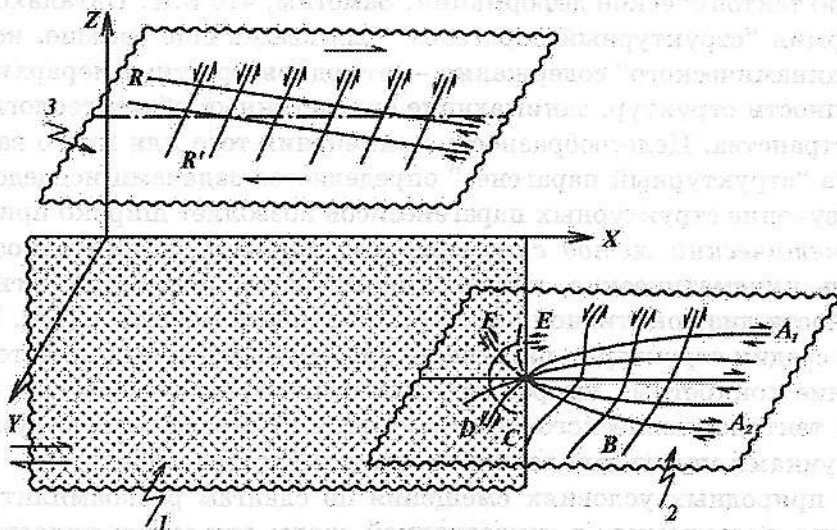


Рис. 6. Обобщенная схема формирования структур II порядка в зонах динамического влияния сдвиговых разломов по С.С. Стоянову [15].

1 — плоскость сдвига; 2 — разрывы у окончания сдвига; 3 — разрывы в зоне скальвания.



статистически. Статистическая стабильность структурных парагенезисов природных сдвиговых зон используется на стадиях синтеза и интерпретации структурно-парагенетического анализа [14]. Комплексирование результатов тектонофизического моделирования с данными структурно-геологических методов обеспечивает выявление генетических структурно-тектонических закономерностей природных объектов — разломных зон.

### Использование диаграмм в структурно-парагенетическом анализе

В качестве способа представления распределения азимутов простирания разрывных нарушений многими исследователями использовались розы-диаграммы. Они строились в целях иллюстрации простираний дизъюнктивов в пределах конкретных территорий (рис. 8) или для их сравнения по простираниям дизъюнктивов (рис. 9). В.П. Уткиным проводилось сравнение направлений сколов Риделя на схеме модели с направлениями аналогичных дизъюнктивов в пределах площади исследований на розе-диаграмме (рис. 10). Б.А. Занкевичем в качестве специализированного варианта метода структурно-парагенетического анализа карт было предложено сопоставление структурных эмпирических диаграмм с соответствующими диаграммами моделей сдвиговых зон, корректных относительно условий подобия деформации [3]. Нужно отметить, что плоские модели в нашем случае являются корректными к геологической среде по соотношению мощности и площади: латеральные размеры изучаемых объектов несоизмеримо велики относительно разведанных глубин.

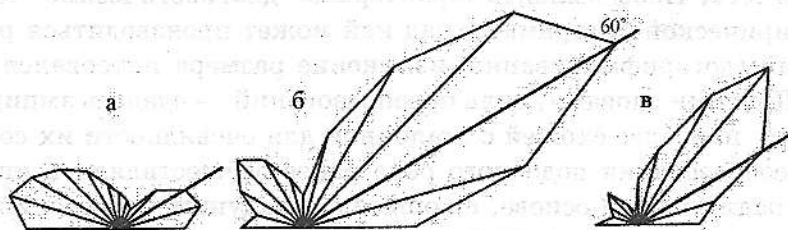


Рис. 8. Розы простирания разломов Байкальской рифтовой зоны [19]. а — юго-западная часть; б — центральная часть; в — северо-восточная часть. Жирной линией показано генеральное простирание рифтовой зоны.

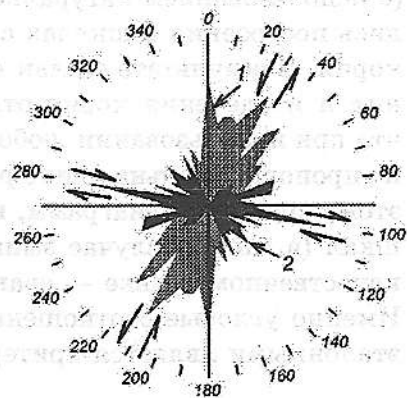


Рис. 9. Соотношение пространственной ориентировки лево- и правосторонних сдвигов (Арминский рудный район) [16].

1, 2 — суммарные розы простираний сдвигов: 1 — левосторонних, 2 — правосторонних; длина лучей прямо пропорциональна количеству разрывов каждого направления.

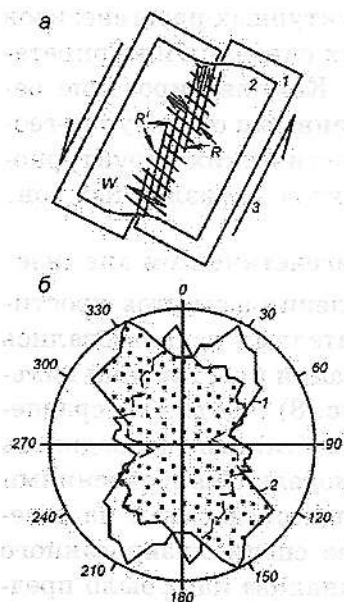


Рис. 10. Характер деформации чехла над сдвигами, проявленными в жестком фундаменте [16].

а – схема эксперимента Риделя [22]: 1 – жесткие пластины; 2 – пластичный материал (глина); 3 – направление смещения пластин; R – скол Риделя; R' – сопряженный скол Риделя; W – ширина сдвиговой зоны; б – диаграммы, отражающие пологое (0-30°) перемещение масс по крутым разрывам (сдвигам) в Самаргинском рудном районе: 1 – в нижнем структурно-формационном комплексе, 2 – в вулканогенном чехле. Замеров соответственно: 1336 и 1520.

Большинство исследователей в качестве единиц, откладываемых по полярной оси, используют количество разломов или количество нормированных измерений/замеров. В рассматриваемых ниже диаграммах используется относительная длина разломов, так как длина отдельных разломов может существенно отличаться, что затрудняет их сравнение.

Для того, чтобы выявить характерные “диагностические” черты каждой эмпирической диаграммы, над ней может производиться ряд преобразований (логарифмирование, изменение размера интервалов, сглаживание). Другими словами, цель преобразований — сделать эмпирическую диаграмму наиболее схожей с эталонной для очевидности их сопоставления. Преобразования подобного рода ранее осуществлялись интуитивно или на традиционной основе, на опыте предыдущих построений. Если на эмпирической диаграмме не были видны достаточно ясно все максимумы, то менее развитые просто выпадали из “загрубленной” интерпретации. Логарифмическая шкала позволяет выявлять такие “нечитаемые” максимумы на розе-диаграмме (рис. 11). Кроме логарифмических шкал (с использованием натурального и десятичного логарифмов) осуществлялись построения в шкалах с использованием квадратного и кубического корня. В результате сделан вывод о том, что результаты логарифмирования и извлечения корня отличаются не существенно. Нужно помнить, что при использовании любой шкалы, кроме линейной, длина лучей уже не пропорциональна длине разломов соответствующего направления. Поэтому сравнение диаграмм, которые построены с использованием разных шкал (в данном случае эмпирических и эталонной), осуществляется на качественном уровне — сравнением азимутов основных групп разломов. Именно угловые соотношения максимумов у эмпирических диаграмм с эталонными является критерием их сходства-различия.

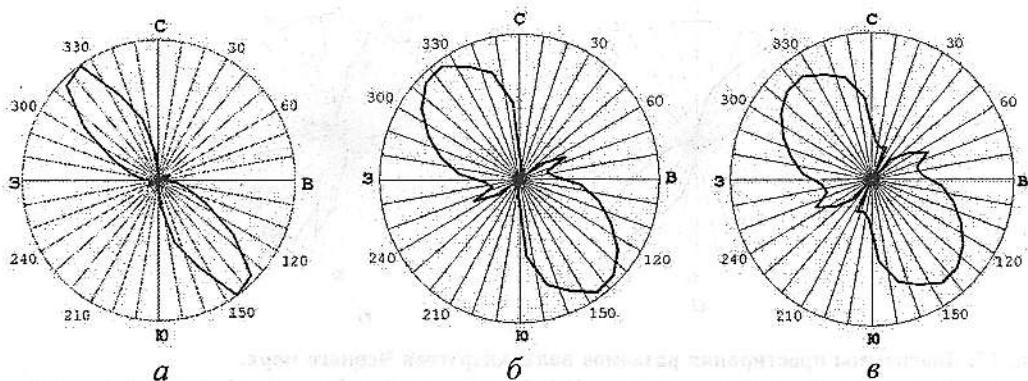


Рис. 11. Диаграммы простирания разломов вала Андрусова Черного моря\*: а – линейная шкала; б – логарифмическая шкала с использованием натурального логарифма; в – логарифмическая шкала с использованием десятичного логарифма.

\* - диаграммы построены на основе временно-мощностной карты Черного моря [21].

Из традиционного интересубъективного опыта структурных построений на диаграммах был сделан вывод о том, что в большинстве случаев оптимальный размер интервала —  $10^\circ$ . Хотя нередки случаи, когда построения с  $5^\circ$ -ными интервалами являются более эффективными (рис. 12). Обычно оптимальный размер интервалов диаграмм зависит от величины и представительности выборки. Нужно отметить, что точность отображения азимутов максимумов зависит от точности построения диаграммы (размера интервалов). Это особенно важно учитывать на этапе сравнения эмпирической выборки с эталонной.

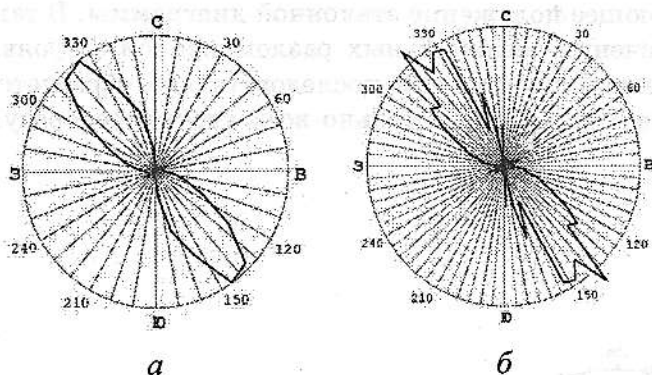


Рис. 12. Диаграммы простирания разломов вала Андрусова Черного моря: а – длина интервала –  $10^\circ$ ; б – длина интервала –  $5^\circ$ .

Иногда для сглаживания многочисленных мелких максимумов и получения более общей картины целесообразно использовать сглаживание окном (в данном случае размер окна — 3 интервала). Все эти преобразования дают возможность более четко выявить характерные составляющие данной эмпирической диаграммы для более точной ее интерпретации (рис. 13).

Эмпирическая выборка простираний разломов, чаще всего, представляет комбинацию эталонных выборок разной представительности относительно главной структурообразующей зоны (линии). Кроме того, разное



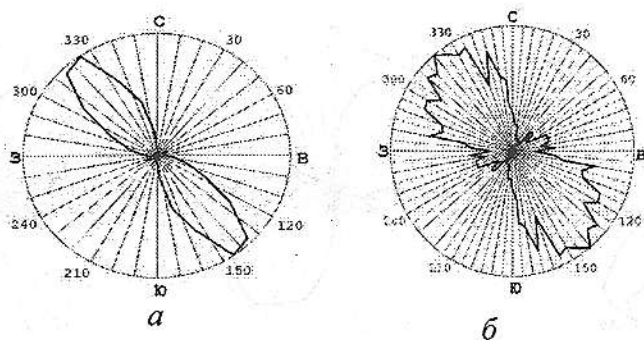


Рис. 13. Диаграммы простирания разломов вала Андрусова Черного моря.  
 а – линейный масштаб; размер интервала – 10°, без сглаживания; б – логарифмический масштаб с использованием десятичного логарифма, размер интервала – 5°, со сглаживанием

направление дислокаций сдвиговой зоны (для них характерны инверсии правого и левого сдвигов) обуславливает на интерпретируемой диаграмме совмещение и зеркальное отображение эталонной диаграммы. Интерпретация фактически сводится к диагностике, “опознанию” тектонофизической позиции всех присутствующих максимумов (для этапа их образования) путем наложения эталонной диаграммы. При этом максимумы эмпирической диаграммы, которые представляют группы вторичных разломов, получают условную тектонофизическую индексацию относительно структурообразующего направления (рис. 14). Это в простейшем случае единичной сдвиговой зоны; в случаях же пересечения структурообразующих зон (линий) в районе исследования для каждого направления подбирается совпадающее положение эталонной диаграммы. В таких сложных случаях пересечения региональных разломных зон с проявленной сдвиговой компонентой дислокаций последовательно образуется разломная сеть, комплементарная относительно всех структурообразующих разломов.

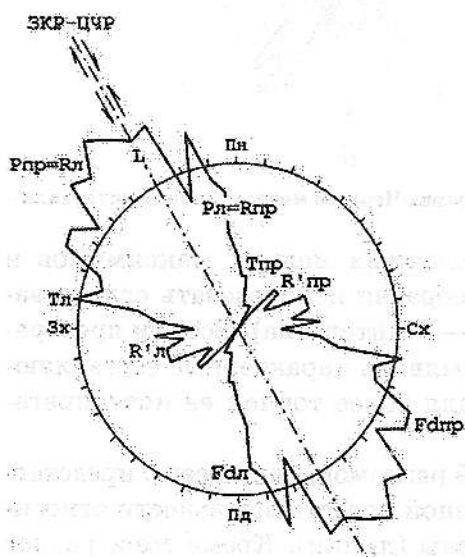


Рис. 14. Результаты интерпретации диаграммы простирания разломов вала Андрусова Черного моря [4].

Условные обозначения: R', T, R, L, P – парагенетические группы вторичных разрывов модели; Fд – оси складок; индексы л и пр обозначают направление сдвига (левый, правый); ЦЧР – Центрально-Черноморский разлом.

В рассматриваемом случае (вал Андрусова Черного моря) структурообразующее направление имеет азимут  $330^\circ$ , что является азимутом простираания Центрально-Черноморского разлома. На диаграмме (см. рис. 14) линия региональной деформации сдвига является структурообразующей при правостороннем и левостороннем сдвиге, поэтому каждый из индексов диаграммы имеет пометку направлений сдвига (*л*, *пр*).

### Выводы

1. Эмпирическая выборка, чаще всего, представляет комбинацию эталонных выборок разной представительности. Кроме того, разное направление движений (правый и левый сдвиг) обуславливает зеркальное отображение эталонной выборки. Интерпретация фактически сводится к "опознанию" всех присутствующих максимумов путем наложения эталонной диаграммы.

2. Представленные методики построения диаграмм достаточно "гибки", они способны создавать варианты изображения диаграмм: в различных шкалах, с различным размером интервалов, при необходимости — со сглаживанием. Их нужно воспринимать в качестве некоего усовершенствования структурно-парагенетического анализа, позволяющего более оперативно получать результаты интерпретации.

3. Наиболее удобный вариант эмпирической диаграммы сопоставляется в итоге с эталонной диаграммой. В нашем случае наиболее сопоставимой оказалась роза-диаграмма в логарифмической шкале с пятиградусным интервалом и сглаживанием. Наиболее эффективными предложенные методики стали в трудно интерпретируемых случаях, примером которых может служить и вал Андрусова Черноморской впадины.

1. Гзовский М.В. Волнистость простираания крупных тектонических разрывов. — Изв. АН СССР. Сер. Геофиз., 1953. — №2. — С. 101-114.

2. Гзовский М.В. Моделирование тектонических полей напряжений и разрывов // Изв. АН СССР. Сер. Геофиз., 1954. — №6.

3. Занкевич Б.А. Элементы сдвиговой тектоники в структуре Криворожского бассейна // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. (Тез. докл. I Всесоюз. совещ. по сдвиговой тектонике). Вып. III. Роль сдвиговой тектоники в образовании и размещении месторождений полезных ископаемых. — Л., Ротапринт ЛГИ, 1988. — С. 93-96.

4. Занкевич Б.О., Токовенко В.С., Трохименко Г.Л., Шафранська Н.В. Структура і перспективи ВВ-носності вала Андрусова Чорноморської западини // Геологія і корисні копалини світового океана. — 2007. — №4. — С. 35-43.

5. Лукьянов А.В. Структурные проявления горизонтальных движений земной коры. — М.: Наука, 1965. — 211 с.

6. Лукьянов А.В., Щерба И.Г. Парагенетический анализ структур как основа тектонического районирования и составления среднемасштабных структурных карт складчатых областей // Тектоника Сибири. — Т. 5. — М., Наука, 1972. — С. 15-24.

7. Лучицкий И.В., Бондаренко П.М., Громин В.И. Изучение разломов экспериментальными методами // Разломы земной коры. — М.: Наука, 1977. — С. 144-154.

8. Муди Дж., Хилл М.Дж. Сдвиговая тектоника // Вопросы современной зарубежной тектоники. — М.: ИЛ, 1960. — С. 265-333.

9. Павлинов В.Н. Глубинные сдвиги и парагенетически сопряженные с ними дизъюнктивные структуры // Изв. вузов. Геология и разведка. — 1977. — №8. — С. 3-14; №9. — С. 3-13.
10. Паталаха Е.И., Гончар В.В., Сенченков И.К., Червинко О.П. Инденторный механизм в геодинамике Крымско-Черноморского региона. Прогноз УВ и сейсмопасности. — К.: ЭКМО, 2004. — 226 с.
11. Паталаха Е.И., Смирнов А.В. Введение в морфологическую тектонику. — М., Наука, 1986. — 151 с.
12. Пейве А.В. Разломы и их роль в строении и развитии земной коры // Структура земной коры и деформации горных пород. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — С. 65-72.
13. Плотников Л.М. Атлас тектонических текстур метаморфизованных осадочных пород. — Л.: Недра, 1980. — 96 с.
14. Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. — М.: ГИН АН СССР, 1987. — С. 173-235.
15. Стоянов С.С. Механизм формирования разрывных зон. — М.: Недра, 1977. — 144 с.
16. Уткин В.П. Сдвиговые дислокации, магматизм и рудообразование. — М.: Наука, 1989. — 166 с.
17. Шахтыров В.Г. Методические рекомендации по изучению сдвигов при поисково-съемочных и разведочных работах. — Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1987. — 67 с.
18. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (в результате моделирования). — Новосибирск: Наука. — 1983. — 112 с.
19. Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. — Новосибирск: Наука, 1977. — 102 с.
20. Ярошевский В. Тектоника разрывов и складок. Пер. с польск. — М.: Недра, 1981. — 245 с. — Пер. изд., Польша, 1974.
21. Finetti I., Bricchi G., Del Ben A., et al. Geophysical study of the Black sea. / "Bollettino di geofisica (monograph on the Black sea)" Bol. Geof. Teor. Trieste. Vol. XXX, №117-118, March-June 1988, p. 197-324.
22. Riedel W. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. — Zentralbl. fur Mineralogie. Abt. Geol. und Paleont. Berlin, 1929. — P. 354-368.
23. Skempton A.W. Some observations on tectonic shear zones. — Proc. Inst. Congr. Intern. Soc. Rock. Mech., 1966. — Vol. 1. — P. 329-335.
24. Wilcox R.E., Harding T.R., Seely D.R. Basic wrench tectonics // Am. Ass. Pet. Geol. Bull., 1973. - V. 26. - P. 74-96.
25. Wilson J.T. A new class of faults and their bearing on continental drift // Nature, 1965. — №207. — P. 343-347.

В статті описано оригінальні методики побудови діаграм простягання розломів, що використовуються в структурно-парагенетичному аналізі картографічних матеріалів регіональних геологічних об'єктів. Побудови проілюстровані на прикладі валу Андрусова Чорного моря, включаючи інтерпретацію побудованих діаграм.

Original techniques for diagrams plotting of faults strike using in the structural-paragenetic analysing cartographical materials of regional geological objects are described. Plotting is illustrated by Andrusov swell as on example, including interpretation of plotted diagrams.