

Губокоувоурашмону

М. И. Свирельову и автору

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ЗОН СКАЛЫВАНИЯ В МОДЕЛЯХ

С. Стоянов

Следуя в общем Кр о п о т к и н а (1961), зонами скалывания назовем зоны, в которых дифференциальные или преимущественно дифференциальные движения приводят к образованию многочисленных нарушений разного типа¹. Такие зоны могут возникнуть либо над, либо между двумя блоками, смещающимися один по отношению к другому. В геологическом смысле они могут быть зонами сдвига, нормального сброса, взброса или любой их разновидности. Ниже обсуждаются результаты полученные на моделях с вертикальным сместителем, движения по которому происходят в горизонтальном, вертикальном или наклонном направлении. Так как деформациям в зонах скалывания уже посвящен ряд тектонофизических (в том числе и экспериментальных) исследований, мы стремились обратить внимание прежде всего на их отдельные более или менее специфические стороны.

В природе зоны общей торзии любых размеров безусловно представляют широко распространенный феномен, очень интересный с теоретической и практической точки зрения. При их изучении, однако, преобладает описательный подход, в связи с чем остаются недостаточно выясненными генетические и пространственные взаимоотношения между составными структурами и их связь с основной структурой. В соответствии с общими положениями теории подобия полезными в этом отношении могут оказаться выявленные на моделях закономерности².

Постановка экспериментов. Почти во всех экспериментах была использована бентонитовая глина с механическими параметрами: влажность $w=65-80\%$, модуль упругости $G_m \approx 10^5$ дуп/см², вязкость (при $\tau \approx 10^4$ дуп/см²) $\eta_{эф} = 10^8-10^9$ Р. Толщина глиняного слоя над твердым основанием достигала 7 см, а горизонтальные размеры — 25—30/50—55 см. Скорость движения в основании была в среднем 0,1 см/мин. Амплитуды смещения редко превышали 3—3,5 см.

¹ Удлиненные нарушенные участки в пределах зоны будем называть полосами или субзонами.

² Tchalenko (1970) устанавливает сходство между зонами скалывания (экспериментальными и природными), отношение размеров которых достигает 1:100000.

Зоны скалывания при горизонтальном смещении. Среди экспериментальных работ этого типа классическими считаются эксперименты Клооса (Cloos, 1928) и Риделя (Riedel, 1929), а наиболее подробно напряжения и деформации в зонах скалывания исследованы Гзовским (1963) и Чаленко (Tchalenko, 1967, 1970).

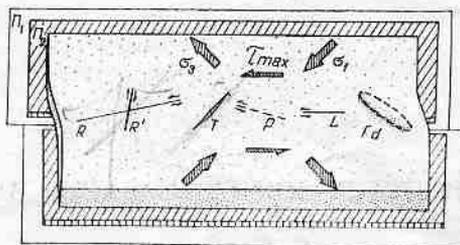


Рис. 1. Схема лабораторной модели зоны скалывания при горизонтальном смещении и присущих ей напряжений и структур

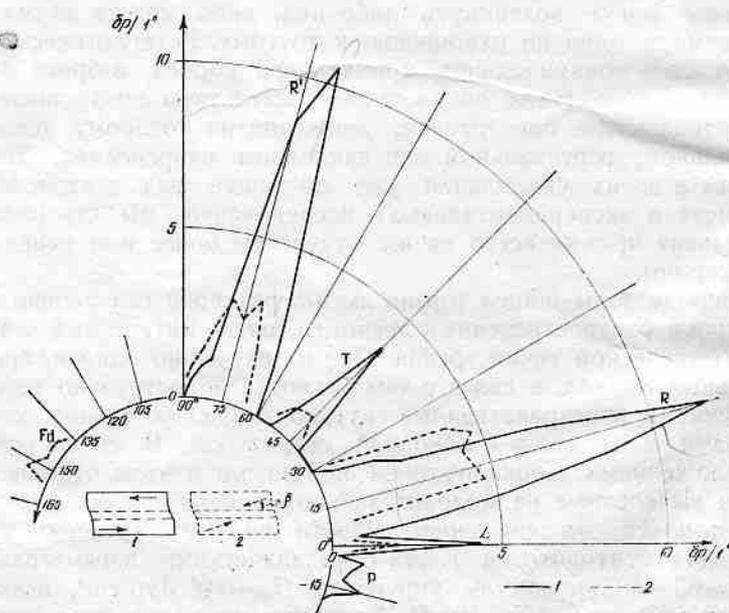


Рис. 2. Диаграмма направлений структур в зоне горизонтального смещения

1 — при простом сдвигании; 2 — при наличии поперечного сжатия $\beta \approx 15^\circ$, т. е.

$$\frac{\Delta_i}{\Delta_{11}} \approx \frac{1}{4}$$

Основные полученные до сих пор результаты, имеющие отношение к предлагаемой работе, можно резюмировать в следующих пунктах (см. рис. 1 и 2):

— Механическое состояние в зоне (по крайней мере на ранних стадиях ее развития) аппроксимируется т. наз. простым сдвигом, характеризующимся смещением частиц параллельно основной зоне и пропорционально их отстоянию от ее оси, причем оси напряжений σ_1 и σ_3 заключают с зоной угол 45° и $\sigma_1 = -\sigma_3 = |\tau_{\max}|$.

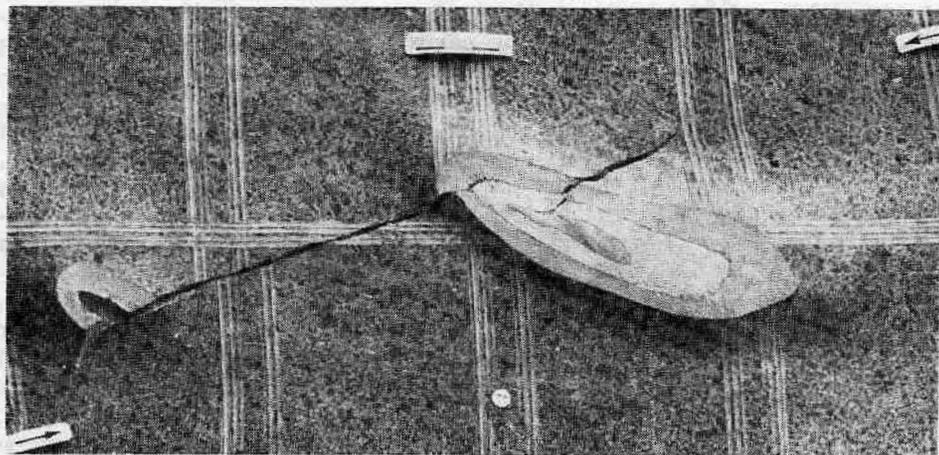


Рис. 3. Складки в зоне горизонтального смещения

— Этим условиям соответствует сопряженная пара нарушений скалывания (R и R')¹, ориентированных под углами $\phi/2$ и $90^\circ - \phi/2$ к зоне (ϕ — угол внутреннего трения). В случае пониженной прочности на отрыв образуются нарушения отрыва (T), поперечные к σ_3 .

— Поздними структурами являются обратные косые нарушения P и продольные сколы L .

— Образование складок (Fd) в сдвиговых зонах иллюстрировано опытами Раvони (1961). По презумпции складки ориентируются поперек σ_1 , т. е. под углом 45° к зоне.

— В условиях дополнительного поперечного сжатия или растяжения („сложное сдвигание“ по Гзовскому, 1963) траектории напряжения максимального сжатия поворачивают соответственно от или к простиранию зоны.

Все это почти полностью подтверждается нашими экспериментами (рис. 2). Несколько заметок можно сделать только в качестве уточнения:

Как и следовало ожидать из общих соображений „поздние“ структуры развиваются весьма незакономерно во времени, а их простирания показывают сравнительно большой разброс (тесный пик на рис. 2 получился из-за неточного измерения наименьших углов). Часть структур поздних стадий вообще нельзя отнести к группам (P или L).

Касательно же образования складок (рис. 3), эксперименты выявили весьма узкий диапазон благоприятных для этого условий. Определяю-

¹ Обозначения R , R' , P — по Скемптону (Skempton, 1966).

щими условиями являются степень расслоения среды и механические свойства слоев (в обсуждаемых опытах складки получались только при использовании смеси глины с петролатумом), а существенными факторами — неровности (зародыши ядер) под сминаемыми слоями и дополнительное сжатие поперек зоны. Если в слоистой среде образуются крупные сколы R , благоприятными для формирования складок оказываются локальные секторы сжатия (Попов, Стоянов, 1969). Простирание складок меньше 45° .

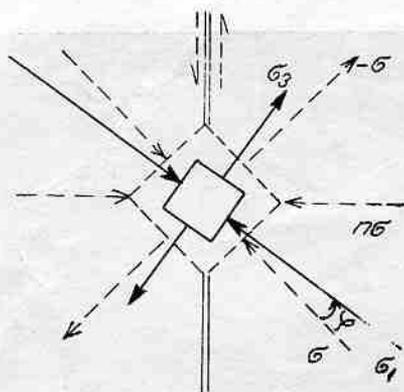


Рис. 4. Изменение напряжений в зоне складывания вследствие наложения поперечного сжатия на простое сдвигание

Зоны сложного сдвига нами исследованы при помощи моделей, у которых директриса смещения была направлена под углом к простиранию зоны. При величине этого угла до 15° заметное изменение в характере деформации не происходило. Установлен был только поворот средних простираний структур (рис. 2) в соответствии с результатами Гзовского (1963). Аналитически, этот поворот (равный повороту φ осей напряжений) можно с приближением определить следующим образом: исходя из рис. 4, где σ и $-\sigma$ — главные напряжения поля простого сдвига; $n\sigma$ — напряжение дополнительного поперечного сжатия, и выполняя надлежащим образом суперпозицию полей, для результирующего поля $\{\sigma_1, \sigma_3\}$ получим:

$$\sigma_{1,3} = \left[\frac{n}{2} \pm \sqrt{1 + \left(\frac{n}{2}\right)^2} \right] \sigma \text{ и } \operatorname{tg} 2\varphi = \frac{n}{2}.$$

Для определения n можно использовать амплитуды Δ_\perp и Δ_\parallel составляющих и перемещений, если считать их отношение равным отношению соответствующих относительных деформаций: $\frac{\Delta_\perp}{\Delta_\parallel} = \frac{\epsilon}{\gamma}$. И так как

$$\frac{\epsilon}{\gamma} = \frac{\frac{\sigma_\perp}{E}}{\frac{\tau_{\max}}{G}} = \frac{\frac{n\sigma}{2(1+\mu)G}}{\frac{\sigma}{G}} = \frac{n}{2(1+\mu)},$$

получаем $n \approx 2(1+\mu) \frac{\Delta_\perp}{\Delta_\parallel}$ (μ — коэффициент Пуассона; при отсутствии специальных определений можем принять $\mu \approx 0,4$).² На рис. 2 сопоставлены результаты при $\Delta_\perp / \Delta_\parallel = 0$ и $\Delta_\perp / \Delta_\parallel \approx 1/4$. Второму случаю соответствует $n \approx 0,75$ и $\varphi \approx 10^\circ$. Установленный на моделях поворот значительно меньше 10° . Несовпадение можно объяснить приблизительностью расчетов, тем более, что используемая техника не обеспечивала точно контролируемых параметров опытов.

¹ Во всех случаях простирание зоны принято 0° .

² Пластическая составляющая деформации практически не сказывается на справедливости этих соотношений.

Стоит остановиться подробнее на нарушениях группы R' . Так как они сопряжены с нарушениями R в поле простого сдвига, с динамической точки зрения их образование вполне естественно, но в силу их поперечного расположения по отношению к зоне они в известной степени кинематически несовместимы с общим деформационным движением. С этим по-видимому связано их специфическое (иногда невыразительное) развитие. Поэтому вероятно и в литературе они освещены недостаточно. Их нет в экспериментах Клооса и Гзовского. Гзовским (1963) их отсутствие объясняется относительно большей скоростью вращения потенциальных плоскостей R' , т. е. кратковременностью действия максимальных скалывающих напряжений на одни и те же материальные плоскости. Наличие нарушений R' в моделях или в природных объектах отмечается отдельными авторами, но только Tchalenko (1967, 1970) приводит разнообразные примеры с развитыми сколами R' .

По нашим наблюдениям (рис. 5) нарушения R' возникают статистически одновременно и развиваются примерно в равной степени с нарушениями R . Большим длинам и амплитудам нарушений R можно противопоставить намного большее число нарушений R' . Их длина ограничивается шириной зоны, а амплитуда — еще и тем, что они относительно рано теряют активность. Смещение по ним затрудняется также и более сильным поперечным сжатием, увеличивающимся (противоположно R) по мере их вращения в поле общего сдвига.

В отдельных локалитетах, однако, нарушения R и R' не только развиты в неодинаковой степени, но и показывают очень выразительную несовместимость между собой. Вдоль зоны нередко наблюдается альтернативное чередование участков, нарушенных квазипродольными и квазипоперечными сколами (рис. 5). При этом сколы R связаны с отчетливым нарушением непрерывности в зоне, со значительным смещением по единичным (или небольшому числу) плоскостям, в то время как скопления R' можно связать с квазинепрерывным сдвигом (вращением)

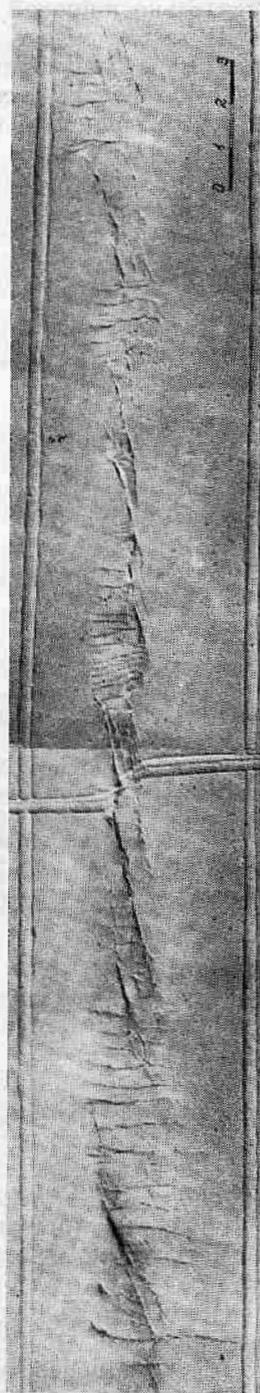


Рис. 5. Характерное развитие косых (R) и поперечных (R') сколов в зоне горизонтального смещения

в относительно широкой полосе, без скачкообразного смещения поперек полосы. В таком смысле, нарушениям R и R' можно приписать, хотя и в известной мере условно, два альтернативных способа деформации — квазихрупкий и квазипластический. Развитие одной или другой группы в данной модели или в данной ее части предстает перед нами сложной функцией свойств материала, скорости сдвига $d\gamma/dt$ (или интенсивности касательных напряжений) и случайных факторов (первичные неоднородности, микротрещины, вторичные неомогенности поля и пр.). При дальнейшем развитии сдвиговой зоны нарушения R' срезаются продольными или косыми сдвигами.

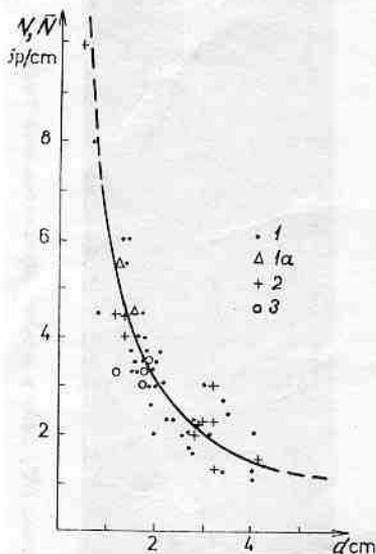


Рис. 6. Зависимость частоты N поперечных нарушений скальвания от ширины d нарушенной ими полосы 1 — зона горизонтального смещения; 1a — то же по результатам Тшаленко (1970, Fig. 5); 2 — зона вертикального сброса (разрез); 3 — зона вертикального сброса-сдвига (верхняя поверхность)

зоны и пр.). Примечательно, что это разнообразие не обуславливает существенного разброса данных.

По нашим впечатлениям, вопрос о существовании нарушений группы R' в качестве природных тектонических структур до сих пор остается открытым. Данные Блайта (Blyth, 1954), Фирмана (Firman, 1960) и Скемптона (Skempton, 1966) недостаточно убедительны; данные же Чаленко (Tchalenko, 1970) основаны только на современных сейсмических нарушениях грунта.

Трещины, пока условно относимые к группе R' , нами установлены в сдвиговой зоне (ширина 50—60 м, амплитуда 70—80 м, квазипластически смещающей Дыбравицкую антиклиналь в Западном Балкане (Пиронков, Стоянов, рукопись). Касательно же больших разломов R' , предполагаем, что примерами могут быть многие поперечные разломы в Крайштинской зоне. Особенности таких сдвигов обладают установленные Харьковской¹ поперечные сдвиги в Преколыницком грабене.

¹ Канд. диссертация.

Зоны скальвания при вертикальном смещении (рис. 7, а, б). Аналитический расчет полей смещений и напряжений над вертикальным сбросом дает Sanford (1959). Теоретически и экспериментально напряжения и возникающие нарушения в таких зонах наиболее детально исследованы Гзовским (1963). На нарушения с обратным знаком смещения по отношению к основному сбросу (антитетические) специальное внимание обращает Lowell (1970).

Как указано Гзовским, в зоне вертикального сброса можно выделить две системы нарушений, развивающихся в известной степени независимо — нарушения одной системы разрастаются от поверхности вниз, нарушения другой системы зарождаются в основе и разрастаются кверху. В связи с тем, что это происходит закономерно из распределения напряжений и деформаций в разрезе, условно можем говорить об области растяжения в верхних уровнях и об области торзии или сдвига (в механическом смысле) — в более глубоких.

Только в области торзии механическое состояние соответствует приблизительно простому сдвиганию (поскольку можно пренебречь влиянием веса покрывающего материала). По геологическому типу нарушения здесь относятся к нормальным сбросам и взбросам, причем те и другие бывают пологими или субгоризонтальными и крутыми или субвертикальными. Большинство крутых нарушений является взбросами, в соответствии со схемой сколов при простом сдвигании. С точки зрения механизма образования и развития нарушений, с которым связан и ряд других существенных особенностей, удачным является подразделение Лоуэля на син- и антитетические (обозначаемые здесь как St и At) в зависимости от знака смещения по ним. С такой точки зрения они соответствуют нарушениям R и R' в зонах горизонтального смещения, которые, очевидно, можно тоже рассматривать как частный случай син- и антитетического скальвания.

Область растяжения приурочена к наибольшему изгибу верхней поверхности наружу и несколько смещена в сторону поднятого крыла. Нарушения представлены противоположно наклоненными нормальными сбросами (синтетическими и антитетическими), являющимися аналогами более глубоких нарушений в условиях значительного растяжения. Их тип и положение указывают на поворот оси максимального растяжения к горизонту (на глубине ее наклон приблизительно равен 45°) и на относительное и абсолютное нарастание растяжения. Сбросы St заметно круче At . Иногда здесь образуются и крутопадающие нарушения отрыва.

Нарушения в области растяжения следует отличать от поверхностных нарушений самой зоны торзии, доходящих на поздних этапах до поверхности. Обычно они представлены только крутыми синтетическими взбросами и сбросами.

На моделях рассматриваемого типа нами исследовано в частности влияние формы сбросового уступа (т. е. ширины зоны) путем применения в одних и тех же моделях прямоугольного штампа и натянутой резиновой ленты шириной от 2 до 4 см. Выявляется прежде всего вышеустановленная обратная зависимость частоты поперечных (At) нарушений от ширины зоны (рис. 7, а, б).

Над прямоугольным уступом обычно наблюдается зона густо расположенных коротких субгоризонтальных сколов, но она скоро срезается

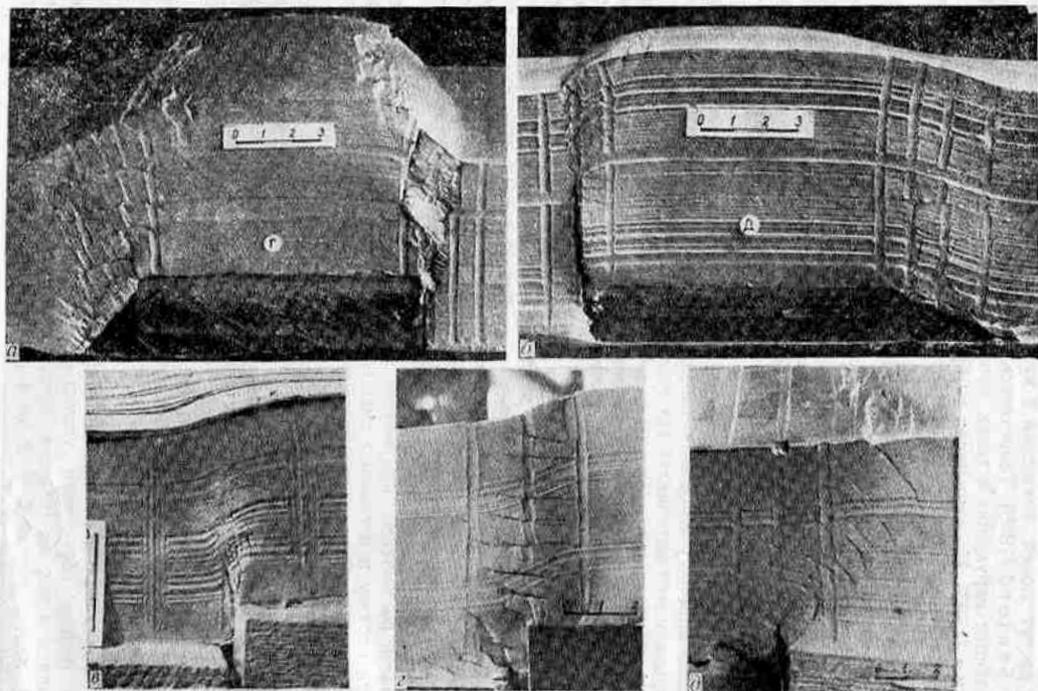


Рис. 7. Нарушения, наблюдаемые на вертикальных разрезах в зонах вертикального сброса (а, б) и вертикального сбросо-сдвига (в, г, д).

по краям или в середине крутыми синтетическими сколами. Иногда зона состоит только из них, почти без поперечных нарушений.

Над наклонными уступами, тем более при большей их ширине, общая торзия (в пределах осуществляемых вертикальных амплитуд) происходит почти целиком за счет развития поперечных нарушений, причем вся зона как будто расслаивается ими. Хотя и не столь многочисленные они достигают значительных размеров и амплитуд, часто обуславливая образование косых и поперечных к ним „третичных“ структур. Явным преобладанием *At*-структур характеризуется и область растяжения. У основания, над сброшенным краем уступа, тоже создается выразительный участок растяжения, какого нет у прямоугольной грани штампа.

В природных объектах крутые синтетические нарушения широко известны и сравнительно хорошо изучены. Почти в такой же мере изучены и особенности области растяжения. На пологие антитетические сколы, однако, и особенно на механизм их образования, обращалось недостаточное внимание (в качестве исключения можно указать примеры Гзовского и Лоуеля). В слоистых средах они наверно чаще всего проявляются как широко известное межслоевое скольжение.

Строение зоны вертикального сбросо-сдвига. В условиях простого сдвига, если в качестве примера принять: а) наклон директрисы смещения 45° (т. е. амплитуды одновременно осуществляемых горизонтального и вертикального движений равны между собой); б) угол скалывания $\alpha_0 = 35^\circ$, зонам этого типа соответствует пара нарушений скалывания, показанная на рис. 8, а. Далее будет видно, что сходная пара плоскостей входит в строение зон, но только как часть установленных парагенезисов структур.

Сначала и более подробно остановимся на деформациях, наблюдаемых на верхней поверхности моделей (рис. 9). По пространственному положению и кинематическим характеристикам на первый взгляд здесь можно выделить три основные группы нарушений скалывания — две косые с противоположными падениями и одну почти поперечную с незначительной вертикальной амплитудой. Факт сосуществования более чем одной пары нарушений и привидного отсутствия парности указывает на весьма сложные динамические и деформационные условия.

Изучение неглубоких структур в сбросо-сдвиговых зонах требует по крайней мере учета растяжения, связанного с изгибом верхней поверхности наружу. Для этой цели нами рассчитано поле напряжений, полученное суперпозицией полей простого сдвига при наклонах директрисы смещения $\psi = 0 \div 90^\circ$ и одноосного горизонтального растяжения поперек зоны.

На полярной диаграмме (рис. 8, б) первое составляющее поле дано жирными линиями, представляющими геометрическое место полюсов осей σ_1 , σ_2 и σ_3 . Для учета растягивающего напряжения вернемся к рис. 4 и соответствующим формулам. Угол поворота осей в плоскости напряжений σ_1 , σ_3 здесь будет $\operatorname{tg} 2\varphi = -n/2$ и на рис. 8, б выразится поперечными дужками (точечные линии).¹ Их длина определяется степенью растяжения, т. е. коэффициентом n . Со своей стороны n находится в непосредственной прямой зависимости от наклона директрисы смещения ψ . В качестве приближения мы приняли линейную зависимость вида $n = k \psi_{\text{рад}}/\pi$

¹ Положение оси σ_2 при этой постановке не изменяется, поскольку не учитывается наклон оси растяжения и предполагается, что смена мест осей не происходит.

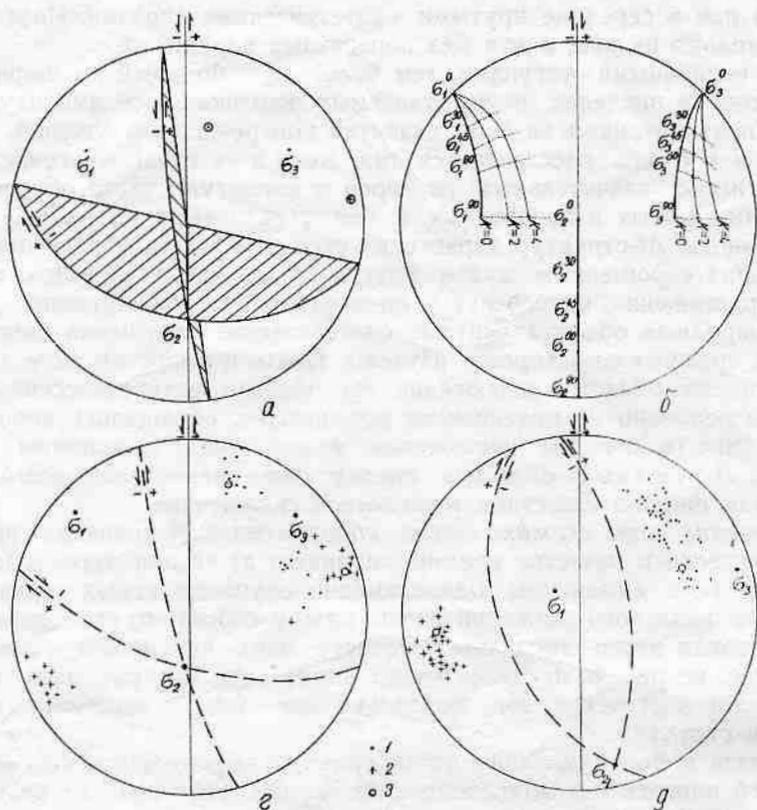


Рис. 8. Теоретические (*a, б*) и эмпирические (*в, г*) диаграммы напряжений и нарушений в зоне вертикального сбросо-сдвига (равноплоскостная проекция, верхняя полусфера)

a — простое сдвигание; наклон директрисы смещения $\psi=45^\circ$, угол скальвания $\alpha_s=35^\circ$; *б* — поле напряжений с учетом поперечного растяжения (индексы напряжений σ_i указывают наклон ψ , k отражает степень растяжения); *в* — нарушения и напряжения в моделях при $\psi_s=25^\circ$; *г* — то же при $\psi_s=55^\circ$ 1 — нарушения с одинаковым по отношению к основной зоне знаком смещения (синтетические); 2 — антигетические нарушения; 3 — полюсы плоскостей, построенных по среднему положению равнонаправленных нарушений

В наших опытах ψ менялся от 25 до 60° ; для k , по грубо ориентировочным расчетам, получается $\sim 3,3$ (строго говоря, его величина зависит от ряда факторов).

Очевидно, теоретические расчеты не учитывают с достаточной полнотой и точностью многочисленные параметры процесса. Дальнейшая конкретизация, однако, наверно привела бы скорее к увеличению спекулятивности, чем к улучшению достоверности результатов. Тем не менее, с их помощью выявляется ряд закономерностей строения сдвиго-сбросовых зон. Подчеркнем, что из-за значительного разброса элементов нарушений и разнообразия их морфологических и кинематических особенностей, эти закономерности вряд ли можно извлечь исходя только из эмпирического изучения отдельных моделей.

Установлено было прежде всего, что по отношению напряжений и деформаций, зону нельзя считать единой. Здесь можно выделить две разновидности поля напряжений, частично перекрывающиеся и сложным образом взаимодействующие в пространстве и во времени. В зависимости от степени влияния одного или другого фактора, условно назовем их полем сдвига и полем растяжения.

Поле сдвига качественно отвечает теоретическому полю, показанному на рис. 8, а. Оно создает крутые взбросо-сдвиги (синтетические) и нормальные сбросо-сдвиги (антитетические). Первые простираются под острым углом, а вторые — приблизительно поперечно к основной зоне. Доминирующей является сдвиговая составляющая. По отношению вертикальной составляющей они показывают интересную особенность: поперечные нарушения, которые в силу своего положения должны быть сжатыми, являются нормальными сбросами („структурами растяжения“); вторая группа, наоборот, представлена взбросами („структурами сжатия“), тогда как давление на их плоскости должно быть пониженным. Это связано с тем, что нарушения обеих групп, зародившиеся в одинаковых динамических условиях, при дальнейшем развитии зоны оказываются под действием различных поперечных им напряжений. Влияние небольшого растяжения на поле сдвига выражается в подчиненном развитии взбросо-сдвигов, откуда и создается впечатление о нечетном числе групп нарушений.

Полю растяжения соответствуют две группы нарушений сдвиго-сбросового характера с противоположными падениями. Они аналогичны во многих отношениях нарушениям St и At из области растяжения сбросовых зон. Сдвиговая составляющая общего смещения, видимо, сказывается преимущественно на их простираемости. В общих линиях оно соответствует простираемости нарушений R в сдвиговых зонах, изменяясь, однако, (случайно или систематически) в значительном диапазоне. Тем временем, сдвиговое смещение по ним невелико, а у антитетических оно едва заметно и имеет знак противоположный основному (наблюдаемые исключения являются поздним эффектом значительных общих смещений). Нарушения этих групп редко бывают параллельными между собой.

Степень выразительности той или другой разновидности поля определяется прежде всего отношением вертикальной и горизонтальной составляющей общего движения (или же наклоном его директрисы). Но и его влияние не одно и то же на всех стадиях и по всей зоне. Во-первых, поле сдвига наиболее выразительно около оси зоны, в то время как поле растяжения заметно смещено в сторону поднятого крыла. Во-вторых, если при данном наклоне директрисы смещения являются первыми, и преимущественно развиваются нарушения одного поля, то далее обычно „вмешиваются“ и нарушения второго поля, частично накладываясь на первые, внося своеобразие в дальнейшее развитие зоны.

Эмпирические примеры этих двух разновидностей полей напряжений и нарушений показаны на рис. 8, в (для поля сдвига) и рис. 8, г (для поля растяжения). В первом случае совпадение с теоретической моделью (рис. 8, б) вполне удовлетворительно, но во втором, очевидно, растяжение значительно превышает принятую нами величину (вероятно вследствие того, что на ранних стадиях горизонтальное смещение в верхних уровнях запаздывает по отношению к смещению основания). Осредненные пло-

скости групп и оси напряжений построены по ранопоявившимся нарушениям, так как именно они отражают соответствующее поле в относительно чистом виде. Здесь, как и на фотографиях (рис. 9, б, в), заметно, что нарушения St и At двух полей попарно сходятся по мере эволюции зоны: наклон синтетических сбросов увеличивается и они переходят в

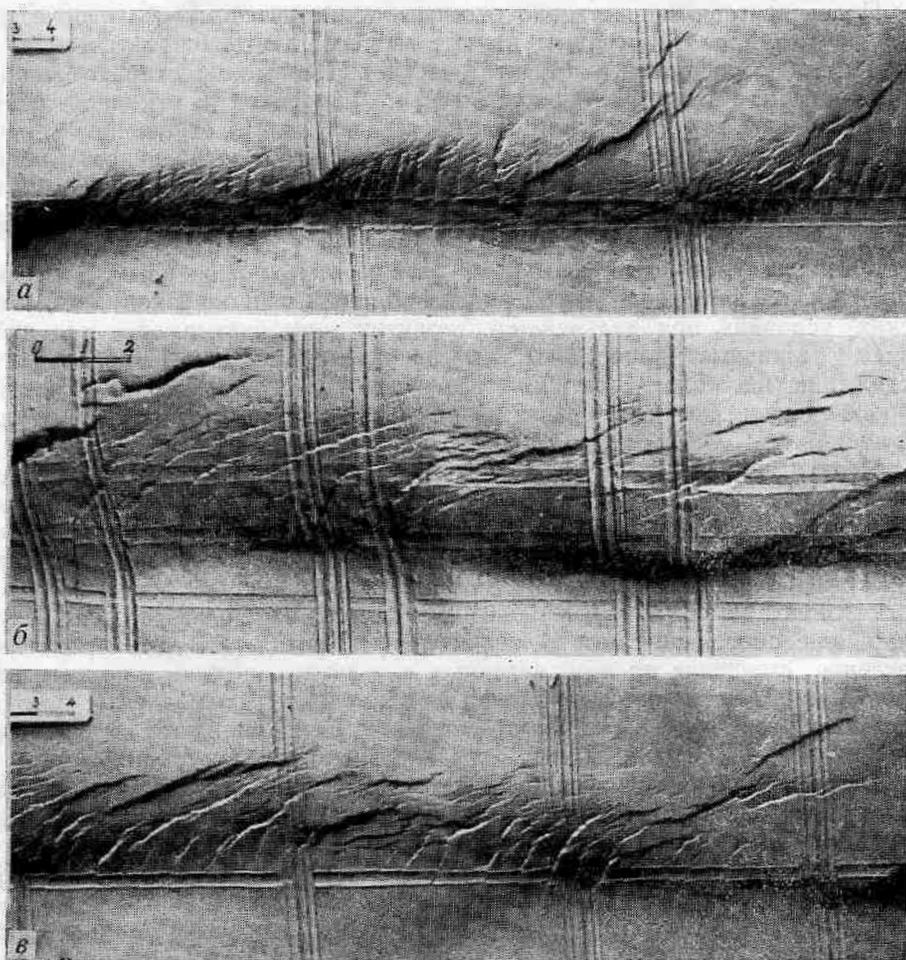


Рис. 9. Нарушения на верхней поверхности зон вертикального сбросо-сдвига
 а — наклон директрисы смещения $\varphi \approx 25^\circ$; б — $\varphi \approx 45^\circ$; в — $\varphi \approx 55^\circ$

синтетические нормальные сбросы; простираение косых антитетических нарушений изменяется так, что они переходят в поперечные. На круговых диаграммах это выражается оформлением субэкваториального (рис. 8, в) и субмеридионального (рис. 8, з) поясов.

И так, вследствие относительной пространственной и темпоральной обособленности двух полей, на неглубоких уровнях получается не един-

ственное промежуточное поле, а сложная интерференция напряжений и деформаций, в которой все же можно выделить две сопряженные пары нарушений скальвания.

Судя по вертикальным разрезам (рис. 7, в, г, д), на глубине строение сбросо-сдвиговой зоны упрощается. Здесь, как и в зонах вертикального смещения, среди нарушений можно выделить две основные группы: крутопадающие синтетические и пологие антитетические. Первые чаще всего образуют веер, вершиной вниз. Их простирания заключают с простиранием зоны острый угол. Над веером обычно создается более широкий участок общей торзии, в котором развиваются поперечные антитетические нарушения (рис. 7, в). Директриса смещения по ним имеет продольную по отношению к зоне составляющую, так что на поперечной грани модели часто наблюдается ступенчатость зоны. Иногда в сброшенном крыле происходит отрыв глины от основания и вся зона становится шире. В этом случае деформация в разрезе осуществляется почти целиком за счет нарушений поперечной группы (рис. 7, г), подобно упомянутому случаю широкого вертикального сбрасывателя. На рис. 7, д показан пример, наглядно иллюстрирующий связь (переход) между антитетическими сколами вблизи поверхности и на глубине. Этот пример, однако, не является общим случаем. Корреляция между глубинными и приповерхностными нарушениями зависит вообще от отношения вертикальной и горизонтальной составляющей основного смещения, но очевидно, что эффекты растяжения (и соответствующие им структуры) имеют сравнительно ограниченное влияние на глубине.

Довольно сложное строение сбросо-сдвиговых зон скальвания, установленное при таких близких к идеальным условиям, какими являются условия лабораторных экспериментов, подсказывает, что однозначное решение прямых или обратных задач полевых тектонических исследований только на основании выявленных здесь закономерностей невозможно. Эти закономерности имеют прежде всего значение важного дополнительного критерия в комплексе методов исследования и в особенности — при детальном изучении внутреннего строения таких зон и при его динамической интерпретации.

С учетом этой заметки, допускаем, что результатом сбросо-сдвиговых движений рассмотренного типа является например строение зоны, описанное Стрельцовым (1971). В качестве вероятных примеров на болгарской территории можно указать Пиринский и Медетский¹ разломы, а также и разломная зона, установленная Маляковым и Димитровым (1972) западнее г. Хасково.

Некоторые детали внутреннего строения зон скальвания показаны на рис. 10. Они дают возможность глубже вникнуть в морфологию и механизм формирования некоторых частных структур. Рис. 10, а — в качестве исключения, нарушения R' , оказавшиеся в локальных условиях растяжения (обычно в связи с окончаниями более крупных нарушений R), могут приоткрыться. В данном случае дальнейшее разрастание первоначального скола R' произошло путем отрыва. Рис. 10, б, в, г — очень часто наблюдаются нарушения скальвания, развивающиеся на своих ранних стадиях как субзоны скальвания, составленные из сколов более вы-

¹ Ив. Загорчев — личное сообщение.

сокого порядка. В наших опытах наиболее четко это выражалось формированием поперечных нарушений из кулисного ряда мелких трещин, квазипоперечных по отношению к данному ряду или косых по отношению ко всей зоне (рис. 10, б — в сдвиговой, рис. 10, в — в сбросо-сдвиговой зоне). Во втором варианте этой особенности косые нарушения

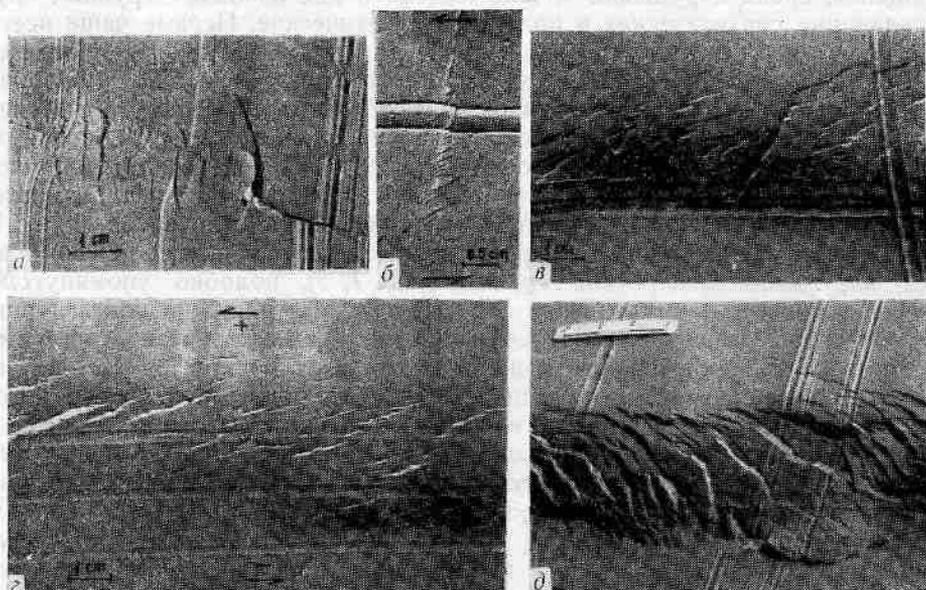


Рис. 10. Детали внутреннего строения зон скалывания (объяснение в тексте)

развиваются из рядов также косых третичных нарушений, но с несколько отличающейся ориентацией (рис. 10, г). Подобное субстроение нарушений R в сдвиговых зонах отмечено Tchalenko (1970), причем эти структуры названы им „структурами R в R “. Рис. 10, д — пространственное соотношение между нарушениями обеих косых групп в зоне сбросо-сдвига благоприятствует оформлению косых грабенов, как правило клиновидных, с вершинами, направленными к поднятому крылу и против его движения (см. также левую часть рис. 9, в; в правой части намечается обратно направленный грабеновый клин, являющимся исключением). Четко выраженные горсты не были установлены.

Заключение. В строении зон скалывания, различающихся по типу и развивающихся под действием разнообразных дополнительных факторов, устанавливается ряд общих особенностей. Поскольку во всех случаях механическое состояние в зонах на ранних стадиях их развития определяется преимущественно простым сдвижением, самыми характерными структурами являются нарушения скалывания, относящиеся к двум сопряженным группам. Нарушения первой группы близки по пространственному положению к основной структуре. Нарушения второй группы, наоборот, приблизительно поперечны и показывают смещение с противоположным знаком. Второстепенные характеристики этой пары нарушений в

разных случаях меняются, но механизм ее образования, как и только что упомянутые основные особенности, всегда одни и те же. Исходя из этого, считаем целесообразным, путем дальнейшего расширения содержания известных терминов „синтетический“, „антитетический“ в пределах этимологического значения этих слов, ввести их в качестве наименований для всех разновидностей проявления рассматриваемых групп. В связи со спецификой условий развития антитетических нарушений, вероятно, в природе они не имеют распространения, сравнимого с распространением синтетических. В то же время, отрывочные данные об их наличии в природных зонах скалывания, их интенсивное развитие в моделях и ценная информация для характеристики зон, которую они содержат, являются фактами, стоящими внимания исследователей.

Среди впервые выявленных особенностей этой группы интересной является количественная зависимость частоты нарушений от ширины нарушенной ими полосы (рис. 6). Следует ожидать, что в зонах другого масштаба и в средах с другими механическими характеристиками эта зависимость изменится численно, но качественно останется подобной. Ее установление в конкретных условиях очевидно имело бы большое значение для детальных структурных исследований и для горных и инженерно-геологических работ.

При наличии вертикальной составляющей смещения, на неглубоких уровнях сдвигаемого объема, на простое сдвигание накладывается более или менее значительное растяжение, изменяющее в большой степени общий вид структурного парагенезиса. Приповерхностное растяжение сказывается особенно сложным образом на деформациях в зонах с наклонным смещением, где две разновидности поля (сдвига и растяжения) проявляются в общем с небольшой разобщенностью во времени и пространстве и сложным образом переплетаются между собой. Вообще, видимо, любое усложнение общей динамической обстановки еще сильнее усложняет созданные ею структурные парагенезисы и их развитие.

ЛИТЕРАТУРА

- Гзовский, М. Р. 1963. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Ч. III и IV. М.
- Кропоткин, П. Н. 1961. Элементарные структуры, их классификация и терминология. — Сб. Методы изучения тектонических структур, вып. II, АН СССР, 3—137.
- Маляков И., М. Димитрова. 1973. Структура на Сьранишката интрузия. — Изв. Геол. и-т, сер. геотект., 21—22.
- Попов, П., С. Стоянов, 1969. О вторичном структурообразовании в связи со сдвиговыми движениями. — Изв. Геол. и-т БАН и КГ, 18, 4—18.
- Стрельцов, М. И. 1971. О горизонтальной составляющей движений земной коры южной части Курильской островной дуги. — Докл. АН СССР. 196, 2, 425—428.
- Blyth, F. G. H. 1954. The southern margin of the Cairnmore of Fleet granite at the Clints of Dromore, Galloway. — Proc. Geol. Assoc., 65, 224—250.
- Cloos, H. 1928. Experimente zur inneren Tektonik. — Centralbl. für Mineralogie, Abt. Geol. und Paldont., 1928 B, 609—629.
- Firman, R. J. 1960. The relationship between joints and fault patterns in the Eskdale granite (Cumberland) and the adjacent Borrowdale volcanic series. — Quart. J. Geol. Soc., 116, 3, 317—345.
- Lowell, James D. 1970. Antithetic faults in upthrusting. — Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 54, 10, 1, 1946—1950.

- Pavoni, N. 1961. Faltung durch Horizontalverschiebung. — *Ecl. geol. Helvet.*, 54, 2, 515—534.
- Riedel, W. 1929. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Centralbl. für Mineralogie. — Abt. Geol. und Paläont.*, 1929 B., 354—368.
- Sanford, A. R. 1959. Analytical and experimental study of simple geologic structures. — *Bull. Geol. Soc. Am.*, 70, 1, 19—52.
- Skempton, A. W. 1956. Some observations on tectonic shear zones. *Proc. I Congr. of Intern. Soc. Rock Mech.*, 1, 329—335.
- Tchalenko, J. S. 1967. *The influence of shear and consolidation on the microscopic structure of some clays*. Ph. D. Thesis, Lond. Univ.
- Tchalenko, J. S. 1970. Similarities between shear zones of different magnitudes. — *Bull. Geol. Soc. Am.*, 81, 6, 1625—1640.

Одобрена от НС на Геол. и-т на П. XI. 1971 г.

FEATURES OF THE SHEAR ZONES IN CLAY MODELS

S. Stojanov

(Summary)

Results from model experiments on vertical shear zones with horizontal, vertical or inclined displacement are analysed. The effect of superimposed transversal compression or extension is also discussed in brief.

The internal structures, inherent to zones with different displacement direction are similar, because of the equivalence of the stress state at the initial stage of their evolution. Two sets of shear are characteristic: one obliquely orientated, and the other — almost transversally to the directrix of the main displacement. With respect to the latter, they show the same and opposite signs of slip, respectively. On these grounds, we denote them with the well-known terms synthetic and antithetic, irrespective of whether they are normal, reverse, wrench- or oblique-slip faults.

As a whole, the two sets manifest a commensurate development: the much larger number and frequency of antithetic fractures may be confronted by the greater length and slip-amplitude of the synthetic ones. Locally, however, a predominant or independent development of only one of them is typical. The two sets reflect two visibly alternative manners of deformation: (a) a distinct interruption in the continuity of the zone along a single or a small number of planes, and (b) a quasi-homogenous ("quasi-plastic") torsion within a relatively wide band. The main factors, governing the manner of deformation, are the mechanical properties of material, the rate of displacement, the width of the zone; but the part played by haphazard causes is obvious, too. Quantitatively, inverse dependence of the frequency N of antithetic fractures on the width d of the band disturbed by them has been established: $N \approx 6/d$ (for widths from 0.3 to 5 cm). Antithetic faults and cracks are an interesting diagnostic feature of shear zones of any type, but their study, and especially their use in tectonic practice, have not received the attention due to them.

In shear zones with vertical movement, effects of extension are manifested down to a small and moderate depth. They are particularly complicated when a displacement occurs in an inclined direction, since two kinds of deformation (conventionally defined as simple shear and extension) are intertwined in time and space.