

УДК 551.243:553.26

© 1991 г.

С. И. ШЕРМАН, В. Ю. БУДДО, А. И. МИРОШНИЧЕНКО

**ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ И ФЛЮИДНАЯ  
ПРОНИЦАЕМОСТЬ ЗОН РАЗВИВАЮЩИХСЯ РАЗЛОМОВ**

Обсуждается вертикальная зональность разломов и способы флюидной проницаемости в зависимости от их глубины и стадии развития. Анализируется влияние закономерностей структурообразования, эволюции деформаций и пространственно-временных колебаний напряженно-деформированного состояния (миграций) на флюидную проницаемость и распределение рудопроявлений в зонах развивающихся разломов. Показано, что неравномерный в пространстве и во времени характер массопереноса в зонах разломов определяется в первую очередь динамикой их развития при ограниченной роли специфики вмещающей среды.

Существует привычное представление о том, что разломы — это своеобразные каналы для магм, а в более общем плане — флюидных систем. С общей геологической точки зрения данный вопрос хорошо разработан, хотя известны случаи, когда в тех или иных глубинных разломах не наблюдается активного массопереноса, или же только локальные участки разломов служат каналами для флюида. Если же рассматривается длительный временной интервал развития разломов, то флюидная проницаемость характерна для определенного геологического времени их развития, и ее причиной считается активизация разломов. В этой связи авторами рассматриваются вопросы проницаемости глубинных разломов с позиции современных представлений о динамике развития разломов, зон их сочленений.

**Факторы контроля флюидной проницаемости зон разломов**

Действительно, для оценки проницаемости разломов как частного случая общей геологической ситуации используются откачки и ведутся расчеты на базе закона Дарси для гидрогеологических и нефтяных расчетов. Закон связывает скорость фильтрации и градиент давления через коэффициент фильтрации и пригоден для пористой, трещиноватой среды [3, 8]. Величина коэффициента фильтрации в простейшем случае зависит от вязкости флюида и характера пористости вмещающей среды, сквозь которую происходит фильтрация флюида [1].

В общем случае при отсутствии в среде трещин флюиды по законам движения следует относить к неньютоновским, аномальным жидкостям. Наиболее простые из них — нелинейно-вязкие жидкости. Они отличаются от ньютоновских жидкостей нелинейностью кривой течения, характеризующей связь касательного напряжения и скорости сдвига при течении (рис. 1). Флюиды могут обладать свойствами, характерными для любого вида неньютоновской жидкости, но ближе всего их поведение к псевдопластическим жидкостям (рис. 1, б). Это структурирующиеся нелинейно-вязкие жидкости, способные образовывать твердообразные структуры, разрушающиеся при увеличении интенсивности деформаций.

Движение флюида сильно зависит от его вязкости, а последняя не является величиной постоянной. При движении в пористой среде она может изменяться в зависимости от скорости сдвига и конфигурации пор, которые могут суживаться или расширяться в результате деформации вмещающей среды. К вариациям вязкости флюида может приводить его микрогетерогенность и способность сорбироваться в скелете пористой среды, изменяя ее гидравлическое сопротивление, и т. д. [1].

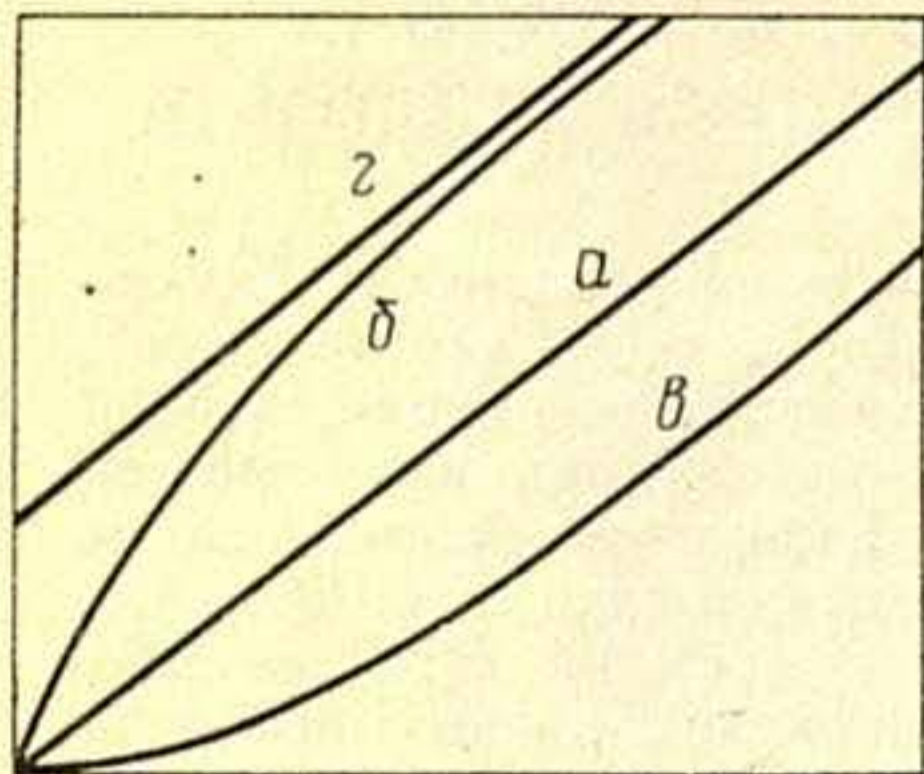


Рис. 1

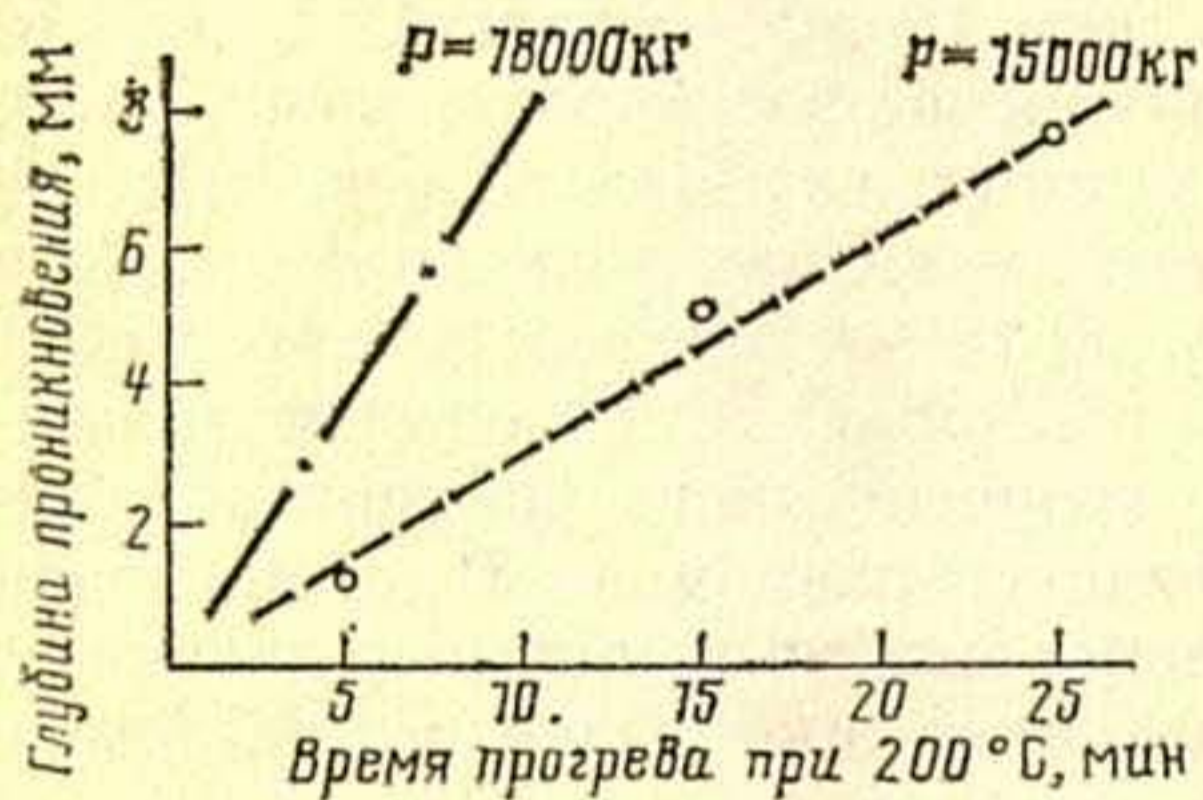


Рис. 3

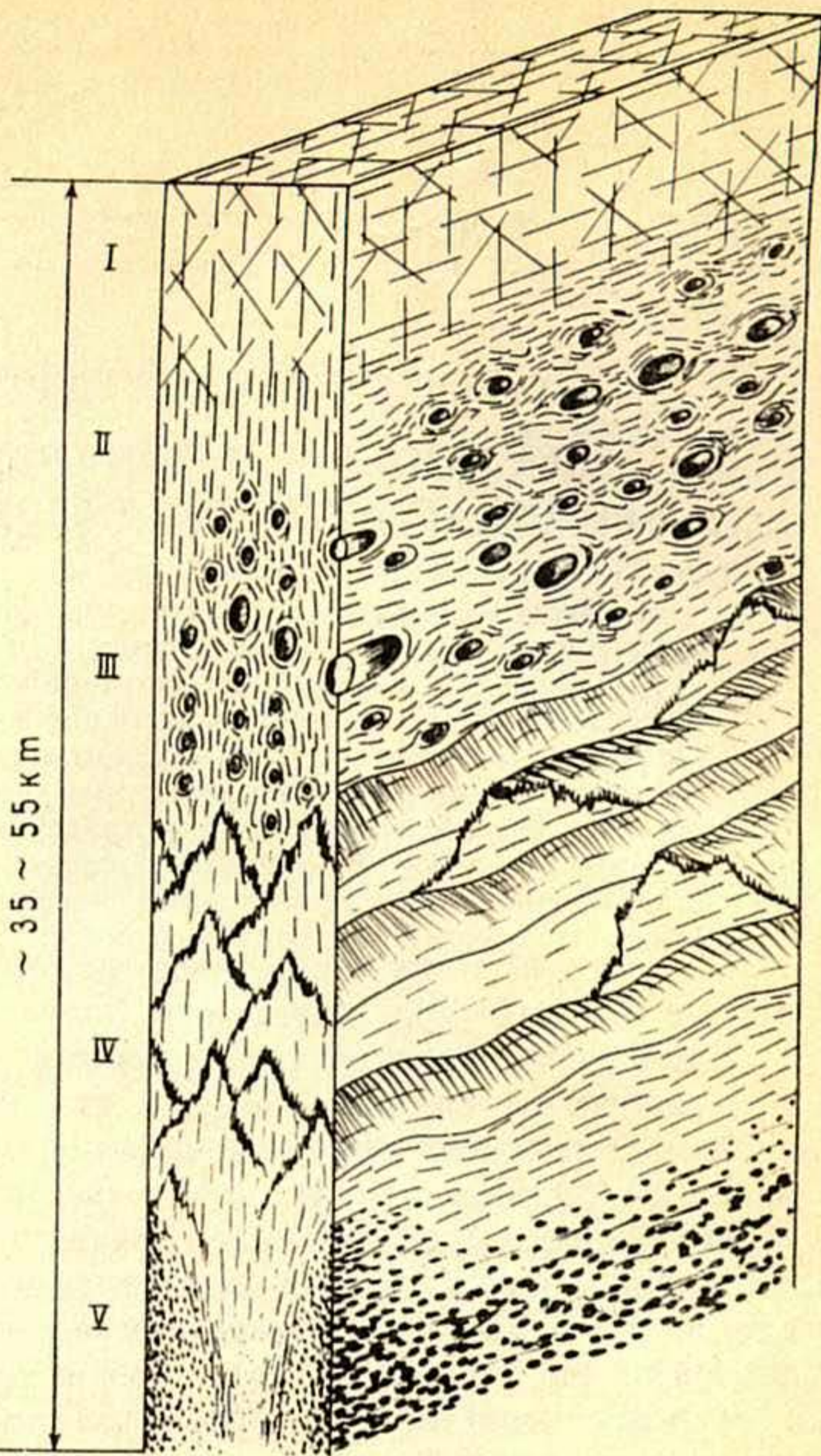


Рис. 2

Рис. 1. Кривые течения ньютоновской (а), псевдопластической (б), дилатантной (в) и бингамовской (г) жидкостей [1]

Рис. 2. Структура крупного глубинного разлома по вертикальному разрезу: I – хрупкое разрушение, II – квазихрупкое разрушение, III – квазипластическое течение, IV – пластическое течение, V – вязкое течение

Рис. 3. Скорость проникновения паров металлов в породу при различных величинах напряжений [7]

Таким образом, движение флюидов в трещиноватой или пористой среде определяется градиентом давления, свойствами флюидов, характером пористости и конфигурацией пор и скоростью деформации слоя, внутри которого совершается массоперенос.

### Стационарная и нестационарная модели развития разломов, вертикальная зональность разломов и механизмы проницаемости

Теперь рассмотрим, как характеристики структуры, закономерности процессов деструкции, особенности протекания деформаций в зонах развивающихся разломов отражаются на их флюидной проницаемости. В первую очередь имеет смысл рассмотреть структуру разломов в соответствии с параметрами, влияющими на флюидную проницаемость. Для этого выделим стационарную и нестационарную модели развития разломов. Первая позволит оценить принципиальную возможность движения флюидов по вертикальному разрезу литосферы в зонах разломов применительно к короткому (в геологическом смысле) промежутку времени развития разлома, и в то же время получить некое усредненное представ-

Тип разрушений и деформации по вертикальному разрезу генерального разлома  
(составлена с использованием данных В. И. Казанского [4])

Тип разрушений, деформаций	Идеальные физические тела подобия	Ориентировочные глубины, км		Преобладающая внутриразломная структура	Тип тектонитов
		сбросы, сдвиго-сбросы	взбросы, сдвиго-взбросы		
I. Хрупкое разрушение	Твердое (тело Гука)	0–5	0–1	Интенсивно раздробленные породы. Закономерность трещиноватости устанавливается трудно	Какириты брекчии
II. Квазихрупкое разрушение	Упругое (тело Кельвина) или вязкоупругое (тело Бюргерса)	5–10	1–2	Хорошо выделяются главные системы трещин. Отчетливо развита система трещин, параллельная плоскости сместителя. Появляется кливаж разлома	Катаклазиты, глинка трения, R-тектониты
III. Квазипластическое течение	Упруговязкое (тело Максвелла)	10–25	2–10	Кливаж разлома. Плоскопараллельные текстуры. Псевдобудинажные образования. Рассланцевание	Милониты, филлониты, R- и S-тектониты
IV. Пластическое течение	Пластическое (тело Сен-венана)	25–40	5–15	Будинажные структуры. Мелкая дисгармоничная складчатость)	Ультрамилониты, бластомилониты, S-тектониты
V. Вязкое течение	Вязкопластическое (Бингамово тело) или вязкая жидкость (тело Ньютона)	>40	>15	Структуры течения	Отсутствует

ление о данном процессе. Вторая же, нестационарная, модель позволит внести в намечаемые закономерности важнейший геологический параметр — фактор времени, необходимый при рассмотрении эволюции разломов и их потенциальной способности к массопереносу.

В структуре крупного глубинного разлома по вертикальному разрезу можно выделить (рис. 2, таблица) пять зон: зону хрупкого разрушения, зону квазихрупкого разрушения, зону квазипластического течения, пластического и зону вязкого течений [9, 10]. Границы между зонами расплывчаты, с постепенными переходами от одной к другой. Глубины перехода зависят от геодинамических режимов и морфологогенетических типов разломов. Для каждой из зон характерен свой, наиболее существенный способ проницаемости флюидов. Для зон I и II ведущую роль в проницаемости играют трещины с учетом их гидродинамической связи между собой. При этом в зависимости от стадии развития разлома проницаемость может быть преимущественно сосредоточенной или рассредоточенной. Ниже по разрезу в зоне II большее значение приобретает поровая проницаемость. Еще ниже, на глубине зон III и IV, где затруднено образование хрупких разрывов и преобладают пластические деформации, характеризующиеся более тонкой микротрещиноватостью (кливаж), значения пористости и проницаемости претерпевают значительные изменения. Эти изменения связаны в большой степени и с интенсивностью и концентрацией касательных напряжений. Именно зона концентрации касательных напряжений служит (после трещин и пор) наиболее благоприятным «каналом» для движения флюидов. Это утверждение не столь очевидно, как трещинная или пористая проницаемость, и требует дополни-

его можно найти в серии очень интересных экспериментов.

При изучении деформаций карбонатных пород при высоких давлениях и повышенной температуре Ю. А. Розановым, Ю. А. Косыгиным и И. В. Лучицким [7] было установлено проникновение паров металлов в отдельные места деформируемого образца из мрамора. Исследована скорость проникновения паров металла в глубь породы при различных величинах напряжений (рис. 3). Результаты экспериментов позволили сделать следующие выводы [7].

1. Наиболее активное продвижение паров металлов идет в зонах сколов, без приоткрытия трещин; несколько менее активно это проникновение идет в зонах пластического течения.

2. Увеличение напряжений и соответственно увеличение деформаций пород приводит к облегчению проникновения газовой и жидкой фазы в зоне пластического течения и зоне микрокатаклаза. Скорость продвижения рудообразующих компонентов в зоне пластического течения при повышенных температурах соизмерима со скоростями фильтрации воды в породах, характеризующихся средней пористостью.

В образце проникновение металла идет по зонам концентрации касательных напряжений, в которых активно развивается мелкая трещиноватость. Зоны сколов и зоны пластического течения имеют общую природу и являются проявлением одного и того же процесса деформирования и разрушения упругопластического материала, происходящего при различных условиях нагружения, а во многих случаях — это разные по времени стадии единого деструктивного процесса.

Следовательно, возвращаясь вновь к стационарной модели глубинного разлома, можно констатировать, что на третьем и более глубоких уровнях его вертикальной зональности флюидная проницаемость связана с увеличением подвижности, текучести и деструкции материала в областях повышенной концентрации касательных напряжений. Близкие по смыслу идеи развиваются в недавно опубликованной работе А. М. Маккэйга [12]. Таким образом, при рассмотрении стационарной модели разлома по глубине можно выделить две существенно различающиеся «чувствительностью» к величине напряжений формы флюидной проницаемости. Первая из них — проницаемость за счет наличия трещиноватости, вторая — проницаемость по зонам концентрации напряжений.

В зависимости от регионального поля напряжений и морфологогенетической принадлежности разломов граница области перехода от одной формы проницаемости к другой будет изменять свой гипсометрический уровень (таблица). При растягивающих региональных напряжениях граница перехода опускается по разрезу коры, при сжимающих — поднимается.

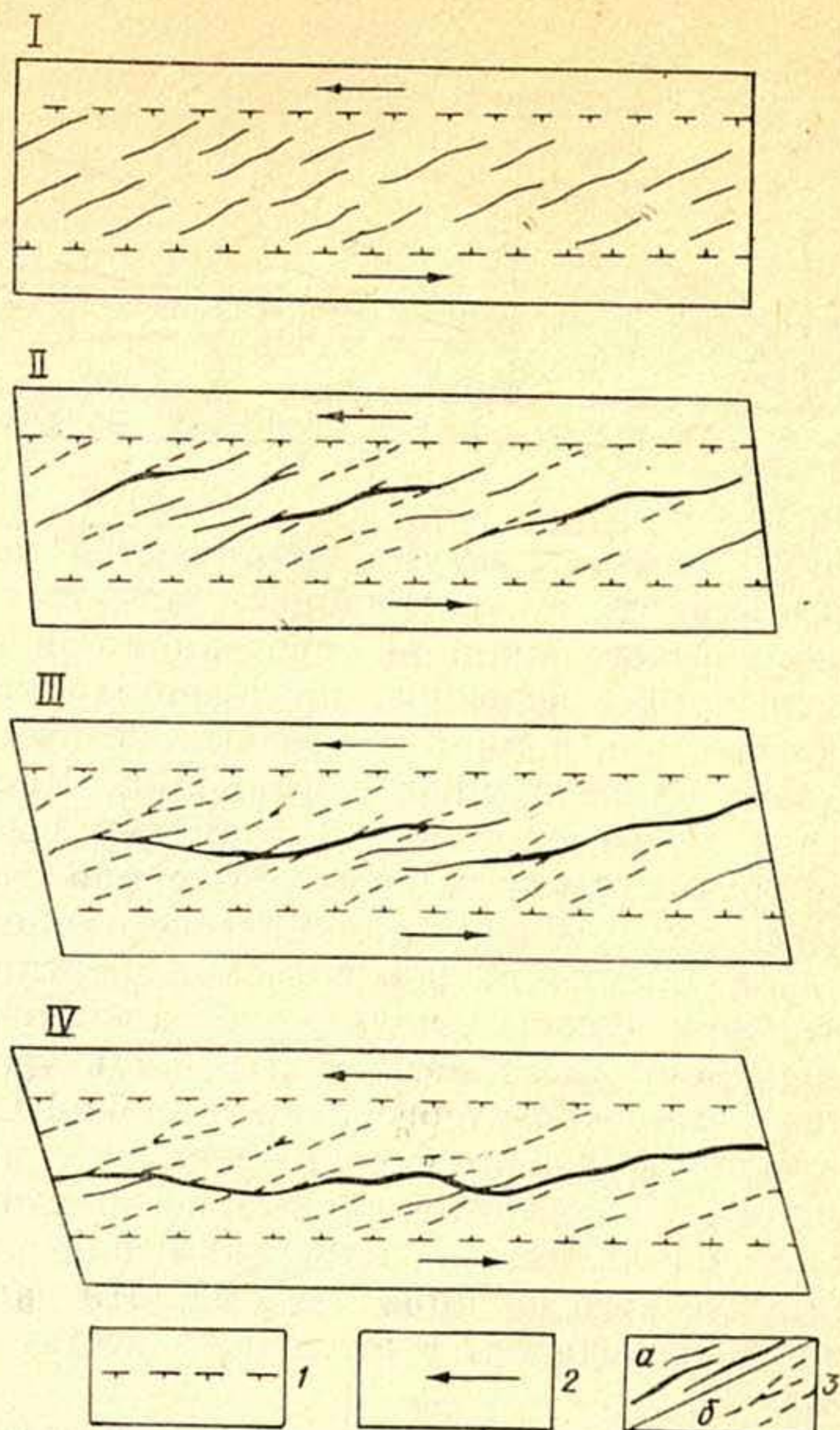
В геологии большую часть процессов принято рассматривать во времени. Поэтому стационарная модель разлома при исследовании структурного контроля флюидной проницаемости не может быть полностью удовлетворительной, поскольку не учитывает фактор изменчивости разломной структуры в геологическом времени. Далее рассмотрим нестационарную модель разлома, его эволюцию и флюидную проницаемость, т. е. ситуацию, характерную для развивающейся зоны разлома.

### **Динамика структурообразования и ее влияние на флюидную проницаемость зон разломов**

В статье использованы результаты экспериментального изучения последовательности формирования трещин и пластических деформаций при деформировании упруговязкопластичной модели на срез. Рождаемые им сдвиговые разрывы — это наиболее распространенная разновидность разломов земной коры. Последовательно оценим ситуации, связанные с первой, а позже со второй формами проницаемости, их пространственными вариациями во времени.

Рис. 4. Эволюция структурного рисунка на поверхности зоны среза по данным моделирования: I–IV — последовательные стадии развития зоны среза

1 — границы области активного динамического влияния среза; 2 — направление смещения крыльев зоны; 3 — активные (а) и пассивные (б) разрывы



Инфраструктура области, гидродинамическая связь между трещинами, составляющими зону среза, не остаются постоянными в течение всего времени развития разлома. Размеры зоны также не постоянны. В первые этапы развития разлома зону заполняет более или менее равномерно распределенная и кажущаяся хаотической мелкая трещиноватость (рис. 4). По мере развития дислокации и увеличения амплитуды смещения трещины растут и гидродинамическая связь между ними улучшается. Проницаемость разлома на первых двух временных стадиях его развития носит характер рассеянной, на заключительных стадиях, когда формируется единый магистральный разлом, проницаемость становится сосредоточенной (рис. 4). В первом случае инфраструктура разлома представляет собой сетку мелких сложно переплетающихся каналов, по которым флюиды могут пропитывать среду и двигаться вверх. В заключительные этапы, во втором случае, флюиды движутся по отдельным более редко расположенным, но крупным трещинам. Здесь скорость их движения выше, изменяется давление на стенки, а проницаемость становится сосредоточенной. От характера проницаемости зависит степень химического взаимодействия между флюидами и вмещающей породой, а также степень прогрева среды. При рассеянной проницаемости обеспечивается длительное взаимодействие флюидов с окружающей средой по всей области динамического влияния разлома, тогда как при сосредоточенной проницаемости горячие флюиды быстро поднимаются по крупным трещинам и в малой степени взаимодействуют с небольшим объемом окружающего пространства. Между этими крайними случаями существует множество промежуточных. Преобладание рассеянной или сосредоточенной проницаемости связано со стадией развития разлома, со степенью его зрелости.

Проницаемость в верхних горизонтах определяется и морфологогенетической принадлежностью разломов. Сбросы, раздвиги и сдвиги имеют

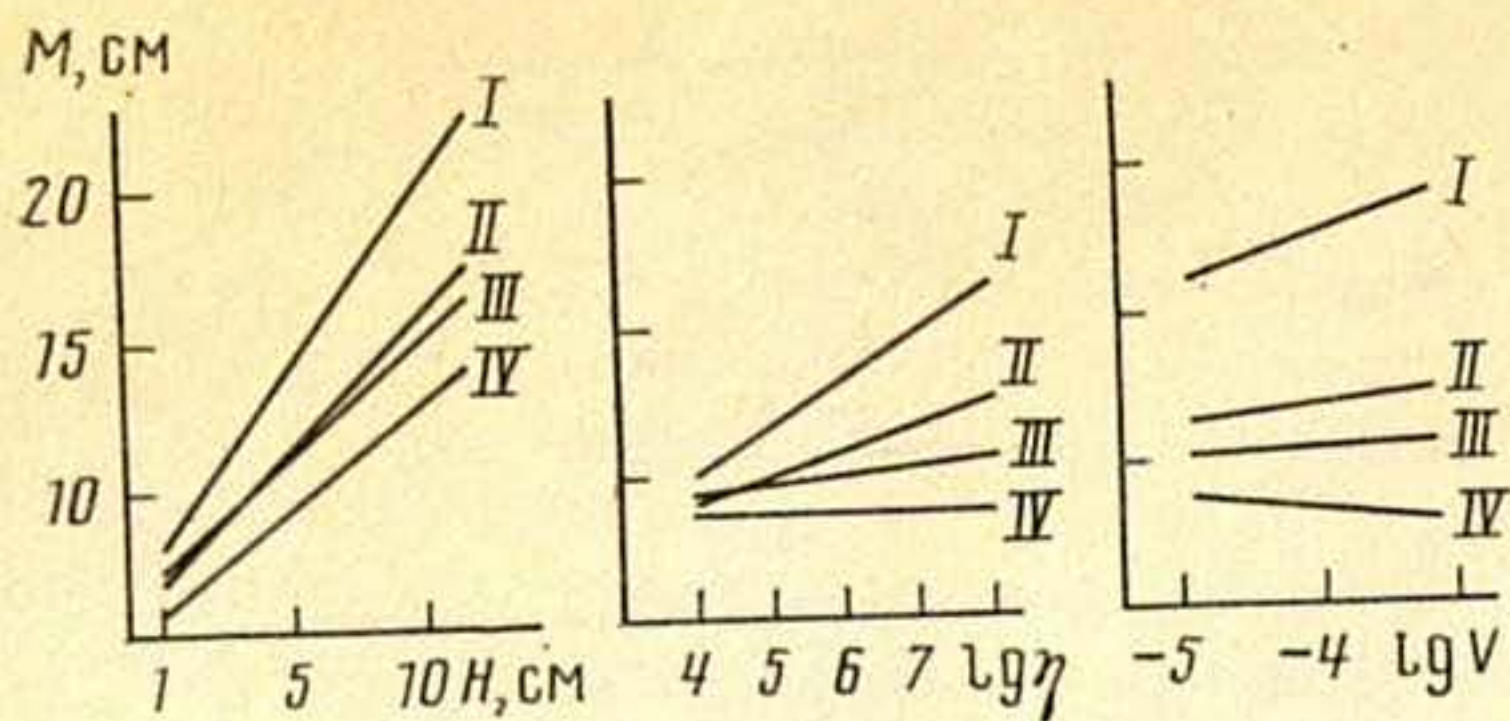


Рис. 5. Ширина области приразломных структурных изменений в зависимости от морфолого-генетического типа разломов: I — срезы, II — надвиги, III — сбросы, IV — сдвиги при деформации сжатия;  $M$  — ширина области активного динамического влияния;  $H$  — толщина моделей;  $\eta$  — вязкость модельного материала;  $V$  — скорость деформирования

разную инфраструктуру, различаются по размерам областей динамического влияния и строению деструктивных полей [5, 11]. Ширина области динамического влияния определяет при прочих равных условиях общий объем потока флюидов, проходящих сквозь зоны разломов. На рис. 5 показано, как влияет морфологогенетическая характеристика на ширину области приразломных деформаций. Наиболее широкую область имеют сдвиги, образуемые при деформации среза, затем следуют надвиги, затем группа сдвигов, образуемых при деформации сжатия, и, наконец, самую узкую область динамического влияния имеют сбросы.

При детальном рассмотрении картина оказывается более сложной, поскольку область динамического влияния по простиранию генеральной дислокации имеет разную плотность трещин и отклонения от средней, только что охарактеризованной ширины. В общем случае это приводит к различию характеристик флюидной проницаемости по простиранию разлома. Изложенные данные позволяют оценить некоторые закономерности повышения и понижения плотности трещиноватости в области динамического влияния разлома. Эти данные объясняют разную степень флюидопроницаемости в различных местах одного и того же крупного разлома.

Более сложные процессы определяют флюидную проницаемость на глубоких горизонтах. Выше уже упоминалась роль зон концентрации напряжений в повышении флюидной проницаемости разломов. Суть здесь в том, что за время развития разлома напряженное состояние среды в его зоне не остается постоянным. В связи с большой длительностью развития разломов изменения напряженного состояния, а значит, и контролируемые им вариации флюидной проницаемости, пока можно изучить только на моделях.

### Этапы развития зон разломов и проницаемость

Используя специально разработанную методику [2], проведена серия экспериментов по изучению динамики полей деформаций и напряжений при формировании срезов. Моделировался процесс образования и развития зоны продольного сдвига (среза) в бесконечном слое определенной толщины из упругопластичного материала (глинистой пасты) при постоянной скорости деформирования. Последняя задавалась с помощью относительного смещения частей жесткой подложки, на которой лежит слой, по линии их стыка. Основной задачей поставленных опытов была оценка изменений напряженно-деформированного состояния в объеме зоны среза в ходе ее эволюции.

Согласно теории подобия, 1 мин времени опыта соответствует 100 тыс. лет, а 1 см на модели — 10 км. При этом возможны отклонения на один порядок величины в виду низкой точности определения вязкости как в природных условиях, так и при моделировании. Экспериментальные результаты можно применять для крупных сдвиговых зон, развивающихся в толщах мощностью порядка 100 км в течение первых десятков млн. лет, однако имеются основания с известной осторожностью приложить полученные закономерности к разломам меньшего пространственно-временного масштаба, если реологию субстрата можно считать существенно неупругой.

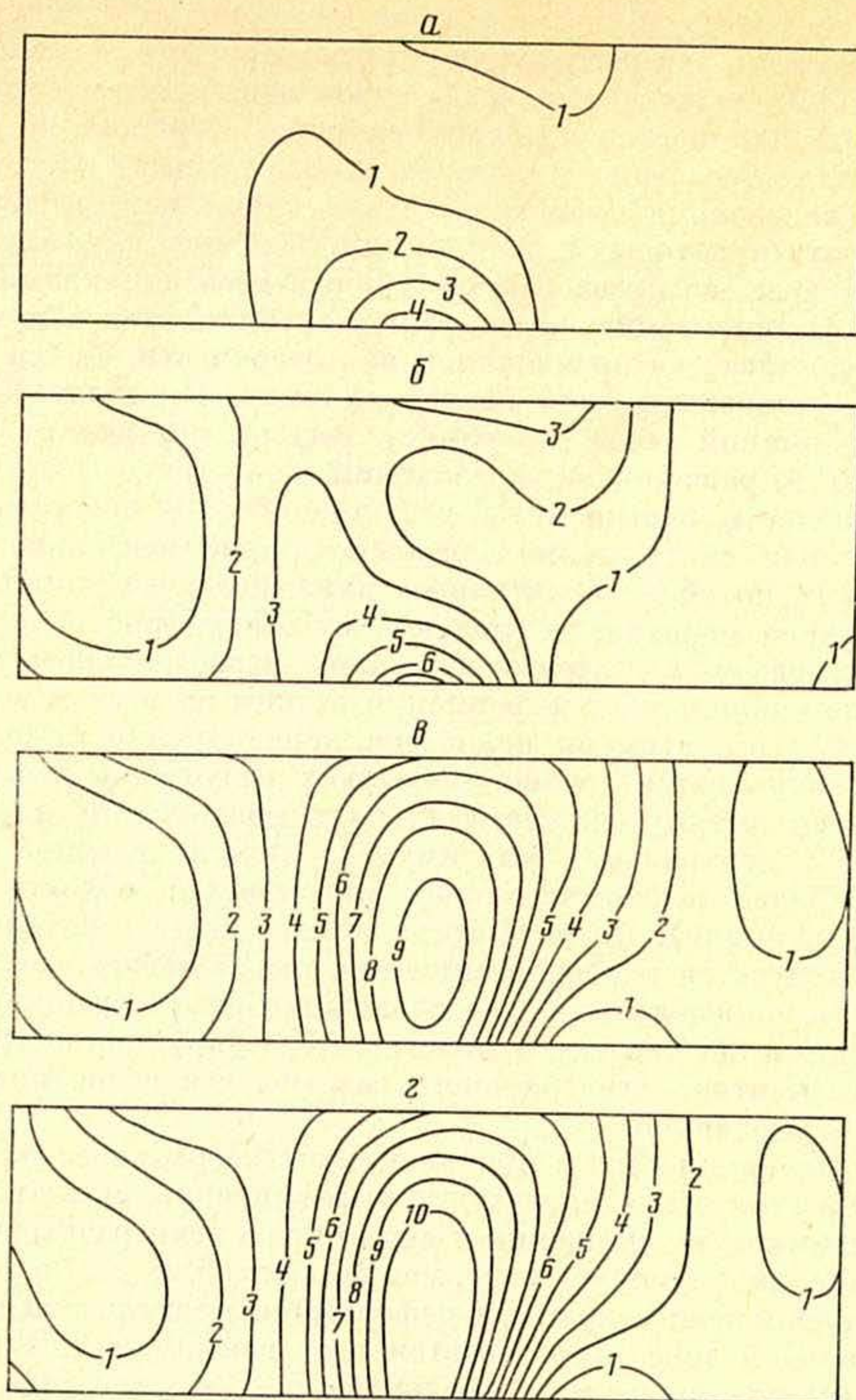


Рис. 6. Эволюция области динамического влияния среза по данным о поле накопленных сдвиговых деформаций по поперечному сечению модели. Этапы: *a* — первый, *б* — второй, *в* — переход от второго к третьему, *г* — третий. Изолинии оцифрованы в относительных единицах

Результаты этих экспериментов позволили существенно дополнить вышеописанную (рис. 4) нестационарную модель разлома рассмотрением развития его зоны в объеме деформируемого слоя при условии роста разлома снизу [6]. При этом главное внимание было обращено на ранние стадии развития зоны, протекающие до формирования в модели магистрального разлома. Эволюцию зоны среза иллюстрирует рис. 6, на котором приведены в различные моменты времени опыта схемы накопленных сдвиговых деформаций в срединном поперечном сечении модели. Эволюция включает три этапа.

*Первый этап* начинается от начала деформирования и заканчивается образованием первых трещин на поверхности. За это время трещиноватость развивается и распространяется в объеме деформируемого слоя. В нижних горизонтах сеть трещин, по всей видимости, успевает претерпеть первые перестройки. Конец первого этапа можно охарактеризовать тем, что дизъюнктивные деформации охватывают разрушаемый слой на всю глубину. Для поля деформаций характерны малые значения (рис. 6, *a*), а их распределение весьма неравномерно, центральная часть зоны еще не проявлена как единая область повышенных деформаций. На поверхности видны пликативные деформации, а разрывы отсутствуют.

Флюидную проницаемость на этом этапе в среднем по всей глубине можно охарактеризовать как рассеянную, контролируемую зонами концентрации напряжений. Гидродинамическая связь между трещинами слабая.

*Второй этап* начинается с появления первых трещин на поверхности и заканчивается образованием магистрального разрыва. В течение второго этапа в зоне разлома происходят структурные перестройки сети трещин, в результате которых при слиянии наиболее крупных и близких по направлению к оси среза разрывов образуется единая магистральная трещина. Ее формирование начинается в глубине слоя в приосевой части зоны и заканчивается проявлением на поверхности. Конец второго этапа отмечен разрушением слоя на всю глубину. В начале этапа распределение деформаций еще сохраняет весьма нерегулярный характер (рис. 6, б), но по расположению изолиний уже отрисовывается в середине сечения область повышенных деформаций. На поверхности наблюдается первичная сетка мелких разрывов, приблизительно равномерно распределенных по области активного динамического влияния. Краткий интервал времени перехода к следующему этапу (рис. 6, в) характеризуется возникновением сегментов будущего магистрального шва и выражается в поле накопленных деформаций резким их ростом в центральной части зоны. С этого времени некоторая неравномерность распределения деформаций сохраняется только в крыльях разлома, а в середине сечения выделяется вытянутый вертикально к поверхности мощный максимум. Причем в центральном максимуме в момент главной структурной перестройки более деформированной оказывается область в середине слоя (по его толщине). На этом этапе за счет роста и слияния разрывов все более усиливается гидродинамическая связь между ними. Флюидная проницаемость, определяемая уже главным образом трещинами, сначала в нижних горизонтах разреза, а затем по мере укрупнения трещин и формирования сегментов магистрального разрыва все выше по разрезу становится сосредоточенной.

*Третий этап* начинается с проявления магистрального разрыва на поверхности. На этом этапе происходит выравнивание, сглаживание его берегов при взаимном их смещении и связанное с этим разрывообразование. Распределение накопленных деформаций (рис. 6, г) слабо отличается от предыдущего момента: в крыльях деформации практически не изменяются, в центральной зоне продолжается рост деформаций. Вся амплитуда смещений реализуется по магистральному шву и в его узкой пришовной зоне, смещения по разрывам в крыльях зоны прекращаются и практически весь объем области активного динамического влияния (за исключением магистрального шва) становится пассивным. Здесь же сосредоточивается и поток флюидов, за исключением тех случаев, когда образуются или активизируются оперяющие структуры.

### **Колебания напряженно-деформированного состояния в зонах разломов и проницаемость**

На основании сказанного выше может создаться мнение, что флюидная проницаемость в ходе эволюции разлома постепенно меняется от хаотически и более или менее равномерно распределенной на первом этапе до сосредоточенной в окрестности магистрального разрыва в конце. И контролируемые ею разновозрастные рудопроявления в зоне в соответствии с изменением характера проницаемости должны располагаться таким образом: ранние — мелкие, равномерно распределенные по зоне; средневозрастные — более редкие и крупные, тяготеющие к осевой линии зоны и также вполне равномерно распределенные; поздние — вытянутые по осевой линии зоны, еще более крупные, отбивающие участки магистрального разрыва. Тем не менее экспериментальные результаты, полученные даже на простых однослойных и предварительно однородных моделях, показывают, что распределение рудопроявлений в зонах крупных разломов должно быть значительно более сложным и неравномерным ввиду сложности самого процесса деструкции.



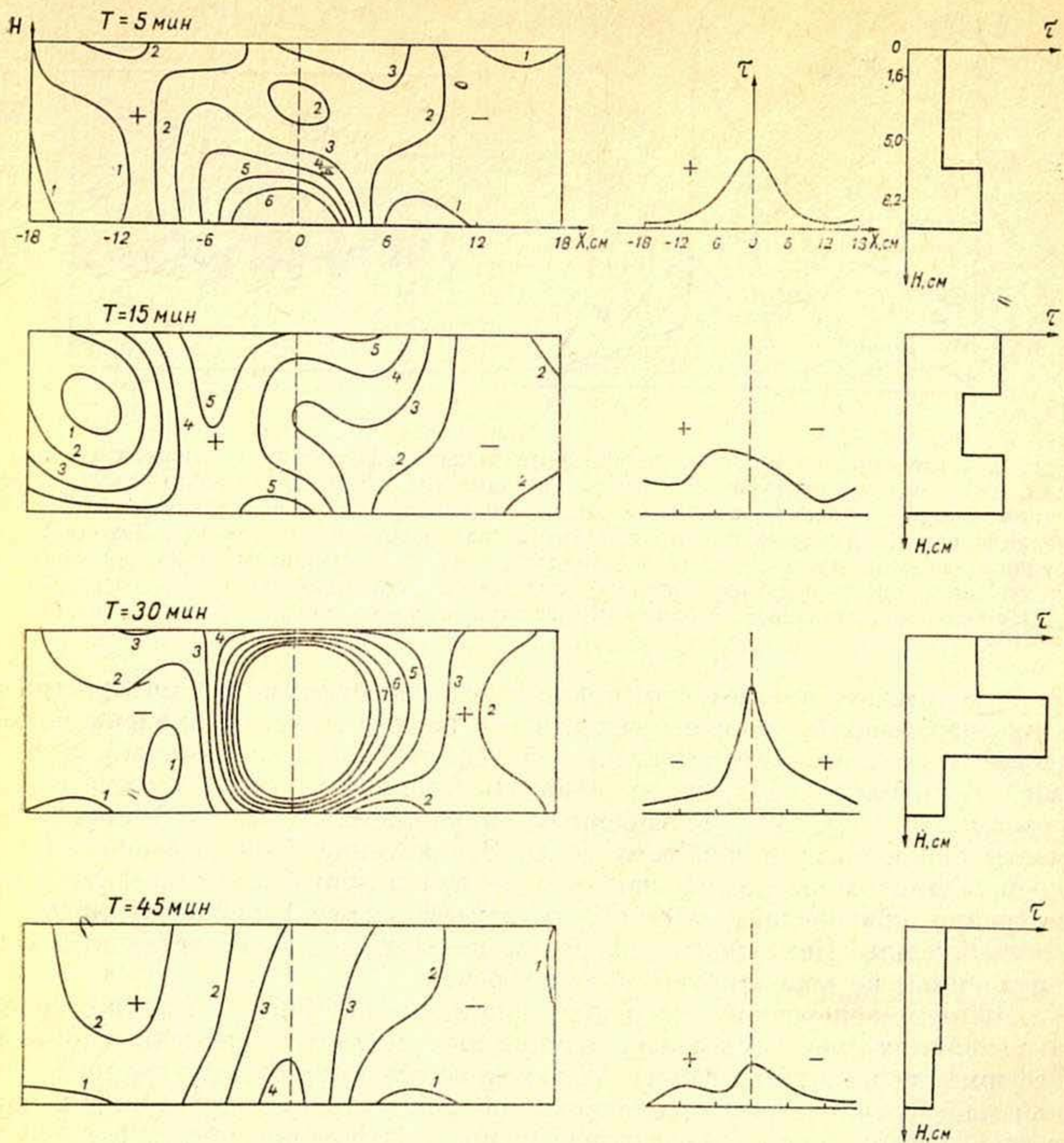


Рис. 7. Скорости деформации в крыльях сдвига и эпюры касательных напряжений вкост простирания и по глубине зоны сдвига. Поперечное сечение перпендикулярно осевой плоскости разлома, которая проходит по центру рисунка.  $T$  — время опыта,  $H$  — толщина модели,  $X$  — расстояние от плоскости разлома в поперечном направлении,  $\tau$  — касательные напряжения. Изолинии скоростей деформации оцифрованы условно. Знаками «+» и «-» показаны более и менее активно деформируемое в данный промежуток времени крыло зоны сдвига

При рассмотрении характера накопления деформаций оказалось, что как средняя по всему объему зоны разлома, так и в отдельных, даже небольших, частях зоны, скорость накопления деформаций изменяется во времени. Скорость накопления сдвиговых деформаций пропорциональна касательным напряжениям и контролирует флюидную проницаемость зоны разлома. Изменения скорости накопления деформации в ходе эволюции сложны, неравномерны, наблюдаются резкие скачки, пики скорости сдвига, сменяющиеся столь же резкими понижениями или другими скачками. В некоторых случаях амплитуда пика может превышать все остальные вариации скорости деформации в 2,5–3 раза, при этом может одновременно активизироваться до 90% объема зоны разлома. Изменения поля скоростей сдвига и напряжений во времени имеют колебательный характер. Во временных колебаниях содержатся периодические составляющие. Все эти особенности динамики напряженно-деформированного состояния должны сказываться на поведении флюидной проницаемости, значительно усложняя картину распределения рудопроявлений в развивающейся зоне разлома.

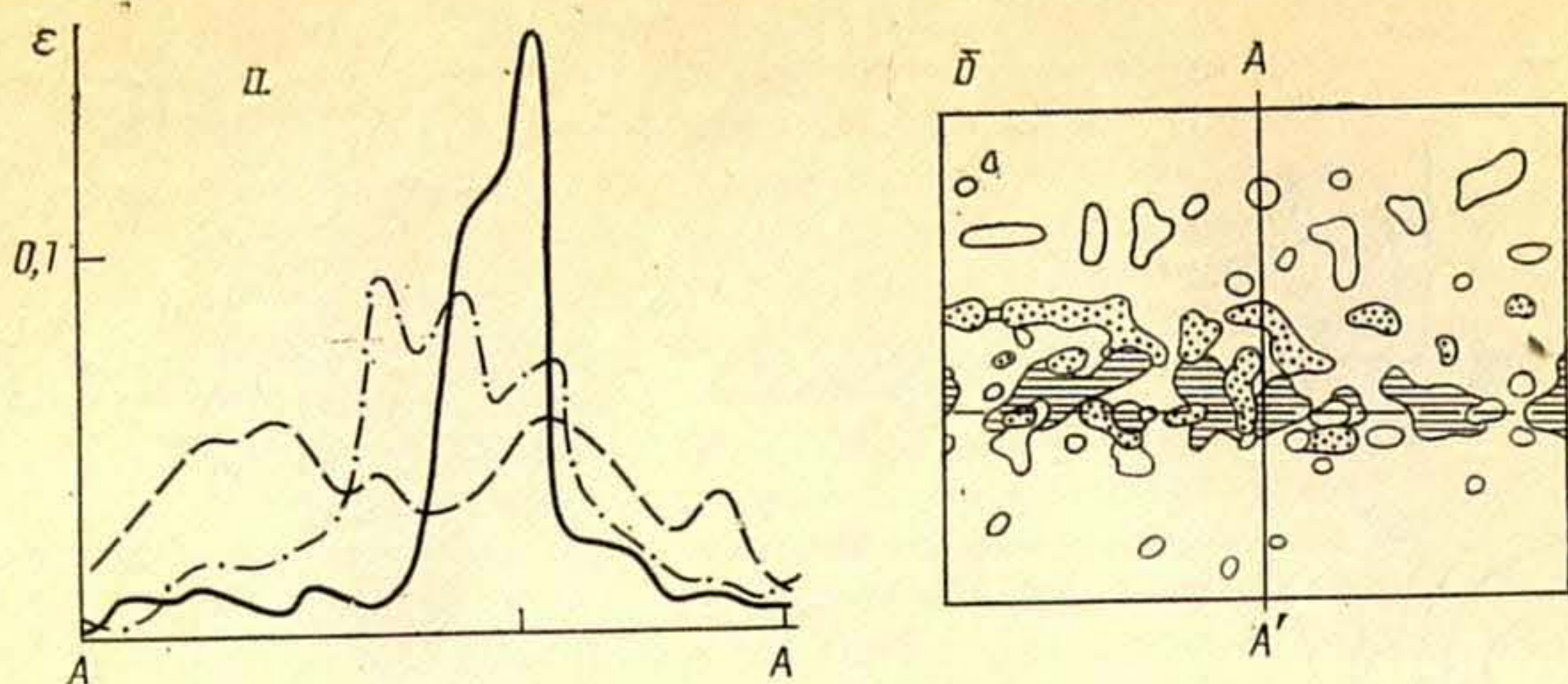


Рис. 8. Изменение во времени дифференциальных деформаций на модели по сечению А-А' вкрест простирания зоны растяжения (а) (пунктир — начало опыта, пунктир с точкой — середина, сплошная линия — конец опыта) и гипотетическое распределение разновозрастных рудопоявлений в зоне раздвиг в плане (б). Локализация рудопоявлений, приуроченных к начальным стадиям развития, показана контурными линиями, к средним стадиям — крапом, к конечным стадиям — штриховкой. Пунктиром показано расположение формирующегося магистрального разрыва

В результате анализа изменения скоростей деформации по пространству разрушаемого слоя отмечено, что в разные моменты времени повышенным уровнем скорости сдвиговой деформации и напряжений, а значит, и проницаемости, могут обладать различные части объема зоны разлома, т. е. области повышенных напряжений и значений проницаемости перемещаются в объеме зоны. Это явление было названо миграцией. Установлены продольная, поперечная и вертикальная компоненты миграции, обладающие сложной структурой, включающей периодические составляющие. Компоненты миграции по разным пространственным направлениям не коррелируют между собой.

Пример поперечной миграции приведен на рис. 7, где показаны в изолиниях для нескольких конкретных моментов времени скорости деформации в крыльях сдвига. Поперечное сечение перпендикулярно осевой плоскости разлома, проходящей по центру рисунка. Изолинии скоростей деформации оцифрованы условно, их величина грубо пропорциональна касательным напряжениям. Показаны также эпюры касательных напряжений, характеризующие изменения средних за промежутки времени касательных напряжений как вкрест простирания зоны разлома, так и по глубине. По картам скоростей деформации и по эпюрам касательных напряжений видно, что большим уровнем деформаций попеременно обладает то одно, то другое крыло разлома, их максимум мигрирует в поперечном направлении из крыла в крыло. Наблюдаются аналогичные миграции также по простиранию зоны и глубине.

В соответствии с этим можно констатировать, что в границах области динамического влияния разлома проницаемость, зависящая, как было показано, от уровня касательных напряжений, различна и имеет максимальные значения примерно в центре области. Проницаемость не остается постоянной во времени, величина ее колеблется, имеет своеобразный пульсирующий характер. Части зоны разлома, обладавшие в некоторый момент времени высокой проницаемостью, через определенный интервал времени снижают ее, а затем проницаемость может вновь возрасти. В каждый момент времени высокая проницаемость характерна не для всей области динамического влияния разлома, т. е. зона флюидной проницаемости уже области динамического влияния. Области повышенной проницаемости сложным образом мигрируют в объеме зоны разлома вкрест простирания, по простиранию и по глубине.

Эффект миграции областей повышенной флюидной проницаемости должен значительно влиять на локализацию разновозрастных рудопоявлений в зонах развивающихся крупных разломов. Это влияние иллюстрирует рис. 8, построенный по экспериментальным данным в предпо-

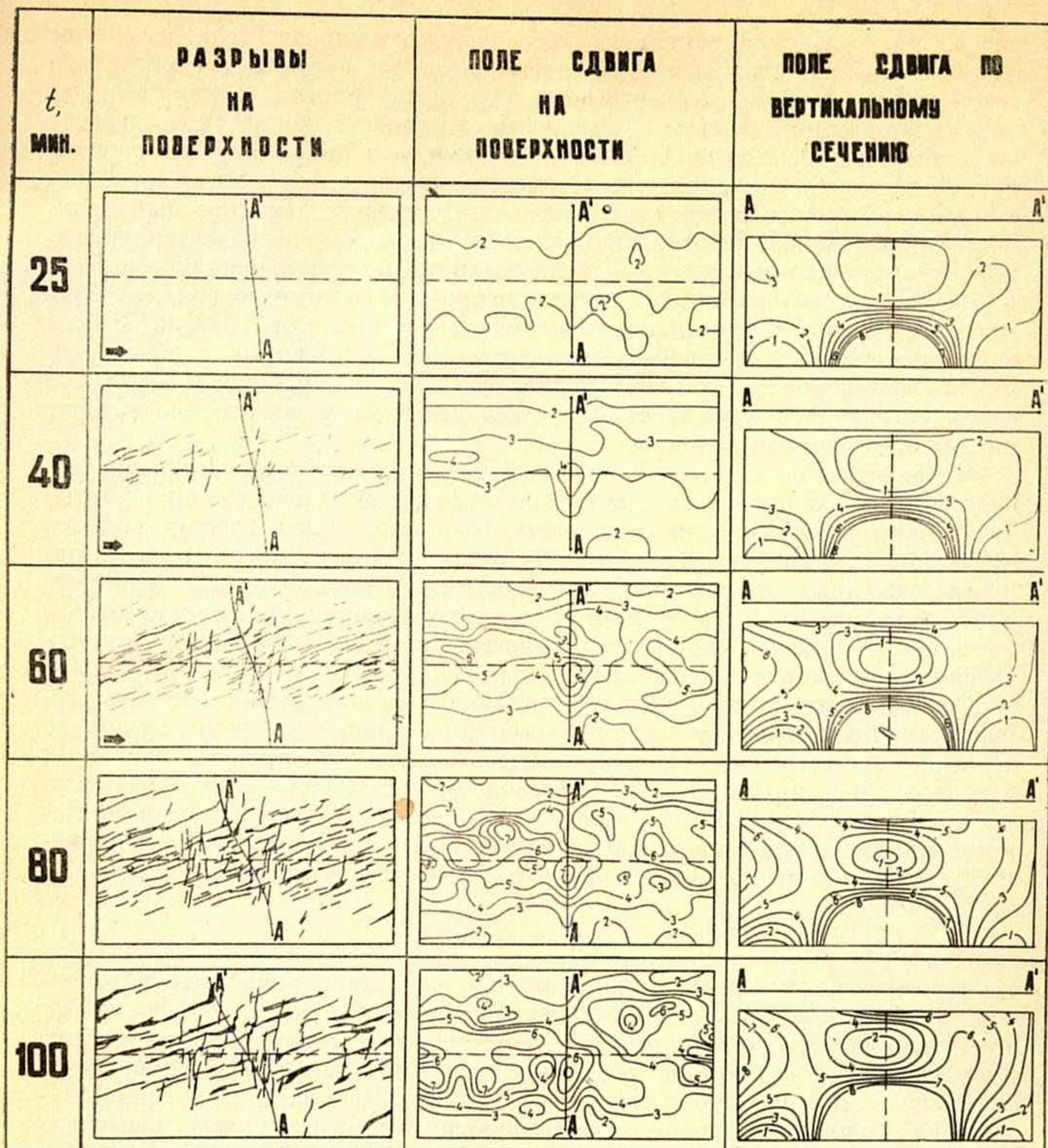


Рис. 9. Неполное соответствие поверхностной структурной картины и поля сдвиговых деформаций распределению накопленных сдвиговых деформаций по поперечному вертикальному сечению модели (А-А'). Изолинии оцифрованы в относительных единицах;  $t$  — время от начала опыта

ложении того, что места, где в данный момент имеются максимальные значения прироста деформации, являются областями повышенной проницаемости и преимущественно в них происходят процессы рудоотложения. На рис. 8, б представлен план зоны растяжения в двухслойной модели, где различной штриховкой покрыты разновозрастные области повышенной проницаемости. Видно, что с ходом времени места потенциальной локализации рудопроявлений (особенно в активном крыле) мигрируют по направлению к будущему магистральному разрыву. Видно также, что области локализации последовательных по времени рудопроявлений практически не перекрываются, что говорит о пульсирующем характере проницаемости, о наличии миграции по дистали и латерали зоны.

Сложность и неравномерность протекания процессов деструкции в областях динамического влияния разломов приводят также к тому, что, имея данные о современном поле тектонических напряжений и новейших деформациях на поверхности, нельзя распространять их на более глубокие горизонты зон разломов. Поля деформаций на поверхности зоны

и поверхностная структурная картина дают возможность только в самом общем плане судить о размерах и конфигурации области динамического влияния разломов, но мало что дают для характеристики глубинного напряженно-деформированного состояния в данный конкретный момент времени (рис. 9). Напряжения могут изменяться по глубинному разрезу как в сторону увеличения, так и уменьшения, несмотря на нахождение в одинаковых и постоянных тектонических условиях. Имеется значительное количество сейсмологических данных, а также непосредственных замеров напряженного состояния в скважинах, подтверждающих это. Так, Г. Шамир с соавторами [13] проанализировали данные об ориентировке максимального горизонтального сжатия на глубинах от 1750 до 2100 м в скважине, расположенной в 4 км от разлома Сан-Андреас, и обнаружили, что ориентировка меняется в пределах  $\pm 37^\circ$  с периодом в несколько сотен метров. Эти особенности процесса деструкции несомненно влияют на флюидную проницаемость.

Неравномерность и колебательный характер квазипластических деформаций объясняются смещениями по сети взаимодействующих разрывов. Взаимодействие сети локальных разрывов, составляющих области активного динамического влияния крупных разломов, можно считать одним из основных механизмов, вызывающих неравномерность и периодичность тектонических деформаций, контролирующих флюидную проводимость, а также сейсмических процессов, которые также могут являться факторами контроля проводимости [14].

Особый интерес представляет проницаемость на самых нижних горизонтах литосферы, где сколько-нибудь длительное время открытые трещины существовать не могут. Здесь полностью процесс движения флюидов обеспечивается второй формой проницаемости — проницаемости по зонам концентрации касательных напряжений. Объем флюидов и скорость их движения определяются главным образом величиной напряжений, объемом зоны их концентрации и величиной вязкости флюида.

### Заключение

В статье рассмотрены стационарная и нестационарная модели развития зон крупных разломов, построенные на основе данных об эволюции пусть сложно организованных, но генетически и кинематически единых тектонических структур. В реальных условиях чаще всего структурные обстановки значительно сложнее, поскольку имеется, как правило, несколько взаимодействующих активизированных структурных элементов различного генезиса, возраста и масштабного ранга. В единой зоне движение потока с разной скоростью вызывает различное давление на стенки, из-за чего в инфраструктуре области разлома создаются участки с дополнительным сжатием или растяжением, что в свою очередь влияет на массоперенос. Создается дополнительная латеральная миграция флюидов.

Нет необходимости приводить серию примеров, когда крупные длительно живущие глубинные разломы контролируют группы эндогенных, в том числе гидротермальных месторождений, отличающихся друг от друга либо характером минерализации, либо временем ее отложения, либо тем и другим. Причин, объясняющих сочетание во времени и пространстве факторов рудоотложения, как известно, много. Среди них изменение формы проницаемости и, следовательно, ее физической сути в процессе развития крупных разломов и состояния вещества в их «корневых» частях, одно из основных, позволяющее снять с обсуждения ряд других, часто дискуссионных не принципиально важных критериев.

### Выводы

1. Флюидную проницаемость разломов определяет их структура, стадия развития и напряженное состояние в областях их динамического влияния.

2. В вертикальном разрезе разлома флюидная проницаемость изменяется (снизу вверх) от рассредоточенной в зонах концентрации сколовых напряжений и перехода их вверх по разрезу в кливажную трещиноватость до сосредоточенной, характерной для верхних горизонтов разломов зрелой стадии развития. Для инициальных стадий развития разломов сосредоточенная стадия проницаемости не характерна. Глубина перехода одной формы флюидной проницаемости в другую в пределах коры зависит от напряженного состояния и морфологического типа разломов. На более глубоких уровнях она, как правило носит рассредоточенный характер.

3. Скорость движения флюидов в зонах разломов носит неравномерный во времени и пространстве характер. Из-за колебательного характера поля деформаций и напряжений изменяется скорость движения флюидов в прикорневых частях разломов, из-за сложного строения деструктивных полей и изменения плотности трещин, а также появления магистральных швов меняется скорость движения флюидов в приповерхностных частях областей динамического влияния разломов. Это приводит к наличию сосредоточенной или рассеянной флюидной проницаемости, к формированию временных застойных зон. Неравномерный в пространстве и во времени характер массопереноса в зонах разломов, связанный со спецификой развития разломов, объясняет многие геологические факты различной по простиранию и по падению, т. е. в пространстве, и дискретной во времени рудоконтролирующей роли разломов. Не всегда для объяснения дискретности и неравномерности явлений необходимо привлекать так называемые геологические особенности и детали.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 208 с.
2. Буддо В. Ю., Бабичев А. А. Методика эксперимента по изучению поля сдвиговых деформаций в объеме упруговязкопластичной модели/ФТПРПИ. 1990. № 1. С. 38–44.
3. Гидрогеологическое прогнозирование/Под ред. М. Г. Андерсона и Т. П. Берта. М.: Мир, 1988. 345 с.
4. Казанский В. И. Рудоносные тектонические структуры активизированных областей. М.: Недра, 1972. 230 с.
5. Лобацкая Р. М. Структурная зональность разломов. М.: Недра, 1987. 128 с.
6. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991.
7. Розанов Ю. А. Деформация карбонатных пород при высоких давлениях и повышенной температуре // Исследования физико-механических свойств горных пород. М.: Изд-во АН СССР, 1961. Вып. 43. С. 120–123.
8. Файф У., Прайс П., Томпсон А. Флюиды в земной коре. М.: Мир, 1981. 436 с.
9. Шерман С. И. Тектонофизическая модель и магматическая проницаемость глубинных разломов земной коры // Глубинное строение, магматизм и металлогения Тихоокеанских вулканических поясов. Владивосток: ДГИ, 1976. С. 257–268.
10. Шерман С. И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.
11. Шерман С. И., Борняков С. А., Буддо В. Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
12. McCaig A. M. Fluid flow through fault zones // Nature. 1989. V. 340. № 6235. P. 600–601.
13. Shamir G., Zoback M. D., Barton C. In situ stress orientation near the San Andreas fault: preliminary results to 2,1 km depth from the Cajon Pass scientific drillhole // Geophys. Res. Lett. 1988. V. 15. № 9. P. 989–992.
14. Sibson R. H. Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems // Geology. 1987. V. 15. № 8. P. 701–704.

Институт земной коры СО АН СССР  
Иркутск

Поступила в редакцию  
25.03.1991

S. I. SHERMAN, V. Yu. BUDDO, A. I. MIROSHNICHENKO

#### VERTICAL ZONALITY AND FLUID PERMEABILITY OF FAULT ZONES

*Institute of Earth's Crust, Sib. Dept. USSR Acad. Sci.*

Internal structure and vertical zonality of the deep-seated fault zones are described. Five vertical zones are distinguished. Vertical zonality is determined by morphogenetic types of the faults and their stress state. A series of experiments on dynamic evolution of faults was conducted to evaluate fluid permeability in time. Stationary and unstationary models of deep-seated faults are developed.