

ИЗУЧАЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ...

Профессор Г. П. Горшков

Природа землетрясений очень сложна. Здесь еще много неясного, много неизученного, много неоткрытого. Но в этой области можно продвигаться вперед, если использовать одновременно методы сейсмологии, геологии и физики. В статье рассматриваются землетрясения Памира и излагается попытка интерпретировать их с позиций как геологии, так и физики.

В Средней Азии происходит много землетрясений. Сейсмические станции регистрируют здесь ежегодно сотни подземных толчков. Чаще всего очаги их располагаются в толще земной коры, т. е. на глубинах от нескольких до 30—40 км. Тектоническая обстановка здесь очень сложна, породы разнообразны, геологическое строение характеризуется многочисленными складками и разрывами, и потому довольно трудно разобраться в том поле напряжений, которое приводит к возникновению как деформаций в породах, так и землетрясений.

Но есть один замечательный участок на этой территории, где картина совсем иная, — это Западный Памир и северо-восточная часть Афганистана. Здесь происходят землетрясения, очаги которых лежат на значительно большей глубине — до 250, даже 300 км, т. е. уже в верхней мантии Земли. Как показывает разрез, проведенный по меридиану 70° 30' с. ш. (рис. 1), в верхних горизонтах очаговой (фокальной) зоны мантии, т. е. на глубине порядка 80—100 км, очаги занимают обширную полосу — до 150 км вдоль линии разреза. Далее вглубь ширина этой зоны уменьшается; на уровне 170 км она составляет приблизительно 50 км. Затем снова наблюдается расширение, и близ отметки 230—

240 км ширина фокальной зоны приближается к тем цифрам, которые отмечены в верхней части разреза. Таким образом, судя по этому разрезу, очаговая зона приобретает правильную X-образную форму или форму песочных часов, и это удивительное обстоятельство требует, очевидно, объяснения.

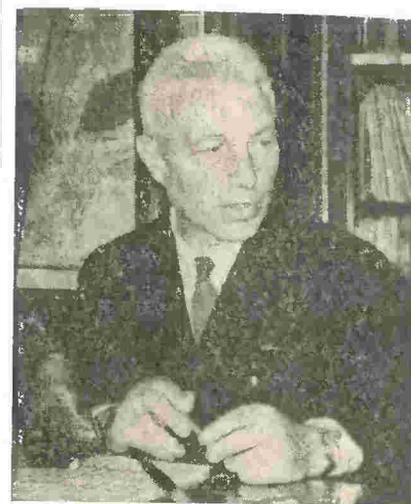
Здесь нам придется сделать небольшое отступление в законы механики.

Представим себе, что из какой-то твердой и изотропной горной породы вырезан образец в форме куба и этот куб подвергнут сжатию с двух противоположных сторон. Возникает вопрос: если давление будет достаточно высоким и превзойдет прочность породы, то как этот образец будет разрушаться, т. е. в каком направлении пойдут трещины, знаменующие собою начало процесса разрушения? Ответ на вопрос дается простой формулой, выражающей так называемый закон скалывающих напряжений:

$$p_t = \frac{P}{2S} \sin 2\alpha, \quad (1)$$

где P — давление, приложенное к образцу; S — боковая грань куба; p_t — тангенциальное напряжение, испытываемое образцом, α — угол, под которым трещина, возникающая при давлении P , наклонена к направлению давления (рис. 2).

Формула (1) показывает, что при данных P и S тангенциальное напряжение (т. е. напряжение, которое ведет к образованию трещины S_1 и смещению по ней блока I по отношению к блоку II) достигает максимальных значений в том случае, когда угол α равен 45°. Это и есть закон скалывающих (или тангенциальных) напряжений: трещины



Георгий Петрович ГОРШКОВ — доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой динамической геологии МГУ, специалист в области сейсотектоники и сейсмического районирования. Автор многих работ по этим вопросам для территорий СССР и зарубежных стран, а также автор учебника «Общая геология». Член Совета по сейсмологии АН СССР и различных комиссий ЮНЕСКО.

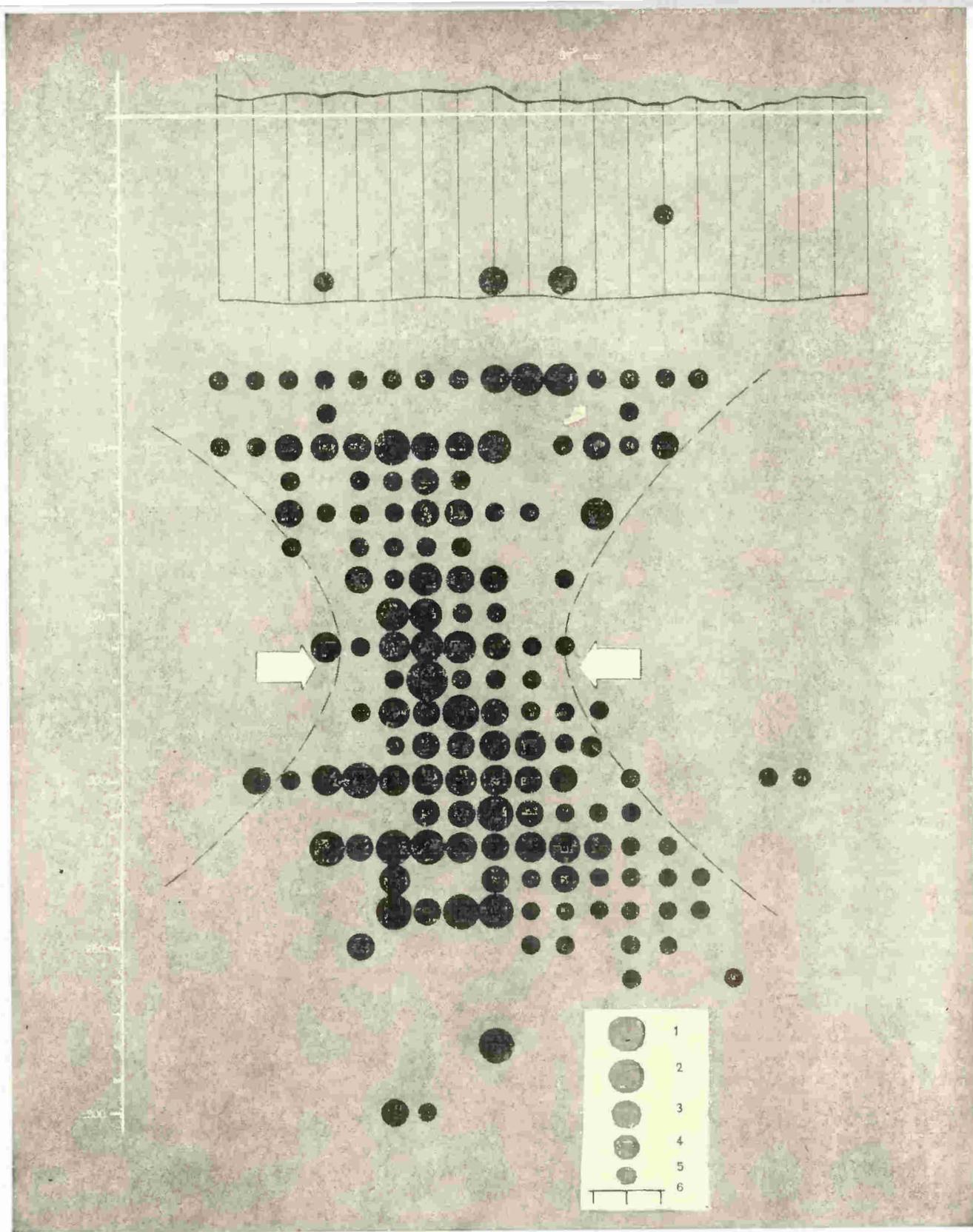


Рис. 1. Очаги землетрясений Памира и северо-восточного Афганистана, спроектированные на вертикальный разрез по меридиану $70^{\circ}30'$ с. ш. с полосы шириной в $1/2^{\circ}$ дуги по обе стороны от разреза. Точность определения положения очага, вследствие особенности метода обработки сейсмограмм, не превышает $0,1^{\circ}$ в плане и 10 км по глубине. Следовательно, промежуточные значения координат и глубины появляться не могут. В этом — причина и того, что очаги образуют как бы правильную ортогональную сетку. Разрез составлен по данным «Атласа землетрясений в СССР», изд. АН СССР, 1962 г., и сейсмических бюллетеней за 1958—1963 гг. Черные кружки показывают очаги землетрясений различных групп интенсивности: 1 — I группа ($M \geq 7 \frac{1}{2}$), 2 — II группа ($6 \frac{1}{2} < M < 7 \frac{1}{2}$), 3 — III группа ($5 \frac{1}{2} \leq M < 6 \frac{1}{2}$), 4 — IV группа ($4 \frac{1}{4} \leq M < 5 \frac{1}{4}$), 5 — V и более низкие группы ($M < 4 \frac{1}{4}$), 6 — земная кора, под лисю — мантия

скалывания при одностороннем давлении возникают преимущественно вдоль плоскостей, расположенных под углом в 45° к направлению давления.

Этот простой теоретический вывод, известный в механике давно, находит себе подтверждение при любом испытании образцов горных пород, подвергнутых одностороннему сжатию. В качестве иллюстрации приведу фотографию опыта, выполненного в тектонофизической лаборатории кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ, по сдавливанию (в вертикальном направлении) образца неслоистой каолиновой глины (рис. 3). Как показывает фотография, трещины в образце (красные линии) действительно возникли в направлениях, диагональных по от-

ношению к направлению давления. Подобные диагональные трещины, возникающие в образце, находящемся под давлением, давно известны под наименованием линий Людерса или линий Мора.

Но тут есть одна деталь, которую следует иметь в виду при анализе деформаций, подчиняющихся закону скалывающих напряжений. Ведь таких трещин, т. е. плоскостей, идущих под углом в 45° к линии давления, сколько угодно! Все семейство таких плоскостей можно нанести на розу-диаграмму (рис. 4), и тогда хорошо видно, что в образце, испытывающем одностороннее сжатие P , возникают две пары сопряженных конусов — «конусы давления» (AOD и BOC), в пределы которых трещины, удовлетворяющие закону скалывающих напряжений,

зайти не могут, и «конусы разрушения» (AOB и COD), где эти трещины концентрируются. Аналогичная картина получается, в принципе, и при вертикальном разрезе.

В геологической практике мы нередко встречаемся с такой системой тектонических разрывов, которая весьма близко отвечает полученной тектонической схеме развития трещин по закону скалывающих напряжений. Так, продольные надвиги, параллельные складчатым нарушениям, оказываются, как правило, пологими, приближаясь к той системе трещин, которая близка к направлению MN нашего графика (см. рис. 4). Наоборот, развивающиеся одновременно с ними сдвиги ориентированы в большинстве случаев в диагональном направлении, приближаясь к нашей системе трещин AC или BD , и обладают крутым, а то и вертикальным падением. Хорошие примеры этому можно найти в Копет-Даге, на Урале, в Крыму. Я далек от мысли объяснить возникновение всех тектонических разрывов действием закона скалывающих напряжений, но там, где иные влияния отсутствуют или ослаблены, этот закон проявляется достаточно отчетливо.

Теперь, если мы сравним форму очаговой зоны Западного Памира (см. рис. 1) с розой-диаграммой трещин скалывания (рис. 4), то без труда заметим, что первая удивительно напоминает вторую, причем «конусы разрушения» розы-диаграммы будут отвечать участкам, заполненным очагами землетрясений. Если это так, а вряд ли в этом можно сомневаться, то отсюда вытекает ряд следствий.

Прежде всего, можно предположить, что здесь, в толще пород верхней мантии, господствуют напряжения горизонтального сжатия в меридиональном или субмеридиональном направлении. И действительно, сейсмологические исследования, направленные на выяснение механизма возникновения очагов землетрясений в описываемой зоне, показывают, что здесь именно такое поле напряжений. Е. И. Широкова (1967 г.), исследовавшая глу-

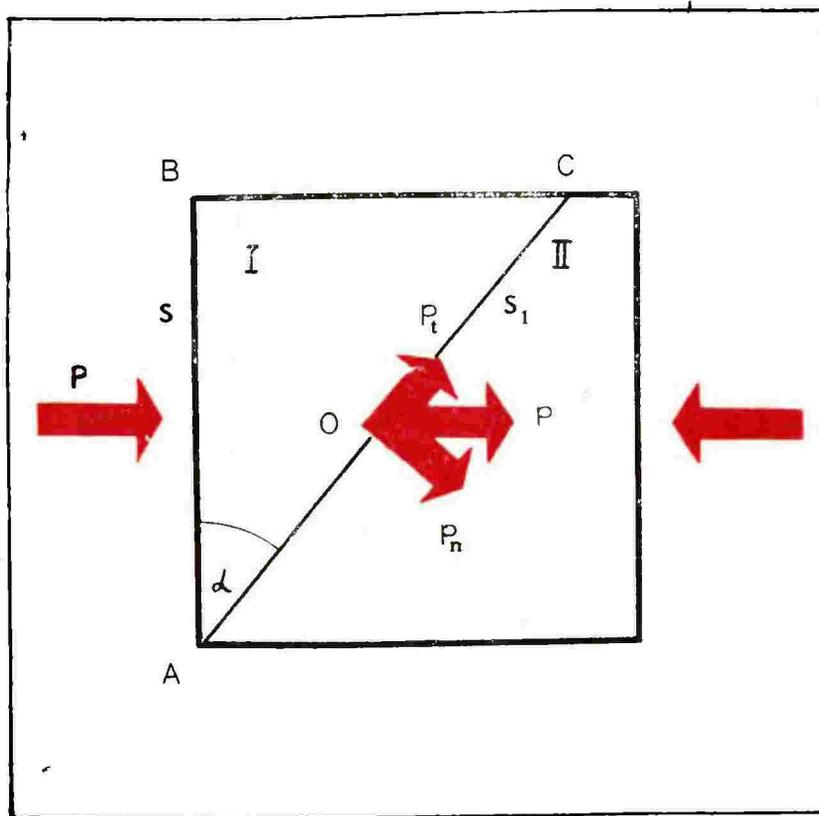


Рис. 2. К закону скалывающих напряжений (объяснение в тексте). P — давление, приложенное к образцу; S — боковая грань куба; S_1 — след произвольно выбранного сечения, т. е. трещины, возникающей под воздействием давления P , и наклонной к направлению давления под углом α ; p — напряжение, приходящееся на элементарную площадку O в сечении S_1 и равное $\frac{P}{S_1}$; P_n — нормальное, т. е. перпендикулярное к S_1 напряжение; P_t — тангенциальное напряжение, испытываемое образцом в направлении S_1 .

бокые памирские землетрясения, пришла к аналогичному выводу, указывая, что оси напряжений сжатия ориентированы в этом районе почти горизонтально, с наклоном, не превышающим 30° .

Далее следует полагать, что в толще пород, слагающих зону средоточия гипоцентров, должны развиваться либо продольные (широтные, субширотные) пологие надвиги, либо крутые диагональные сдвиги: левые — при северо-восточном простирании, правые — при северо-западном.

Геологические наблюдения показывают, что действительно (в пределах, доступных для непосредственного изучения) в осадочной оболочке преобладают тектонические разрывы, укладывающиеся в эту схему, причем протяжение и амплитуда как продольных надвигов, так и диагональных сдвигов оказываются в ряде случаев весьма значительными (километры)! Изучение методами сейсмологии тех разрывов, ко-

торые располагаются в мантии и, следовательно, недоступны глазу геолога, показывает, что они отвечают изложенной схеме, хотя здесь конкретных результатов пока немного. В качестве иллюстрации можно привести землетрясение 6/1—1951 г. (II группа интенсивности, магнитуда $M = 7$, глубина очага $h = 220$ км), для которого М. В. Гзовским (1966 г.) получены элементы, характеризующие механизм движений в очаге. Разрыв, с которым связано землетрясение, представляет собою продольный (субширотный) надвиг с падением сместителя к югу под углом около 50° в полном соответствии с тем, что требуется общей схемой.

Здесь уместно еще раз сослаться на работу Е. И. Широковой (1967 г.), которая указывает на то, что в этом районе плоскости сейсмогенных разрывов обладают наклонами от 35° и более, чаще всего $40-50^\circ$. Кроме того, преобладают подвижки по падению плоскости разрыва и, ре-

же, по простиранию, т. е. наряду с продольными надвигами здесь встречаются и взбросы и сдвиги — опять же в соответствии с общей схемой. Следует полагать, что при дальнейшем изучении механизма развития движений в очагах (т. е. так называемых динамических параметров очагов) будут найдены новые доказательства реальности гипотезы о сейсмогенном значении разрывных дислокаций, подчиняющихся закону скалывающих напряжений.

Затем еще одно обстоятельство. В случае реальности изложенного механизма разрешения напряжений следует ожидать, что наиболее часто землетрясения будут возникать в центральной части X-образной фокальной зоны и здесь же они будут достигать наибольшей силы. Анализ данных, полученных по землетрясениям с 1924 по 1963 год (на основании которых составлен рис. 1), показывает, что так оно и есть. В небольшом объеме центральной части, на глубине порядка $160-180$ км,

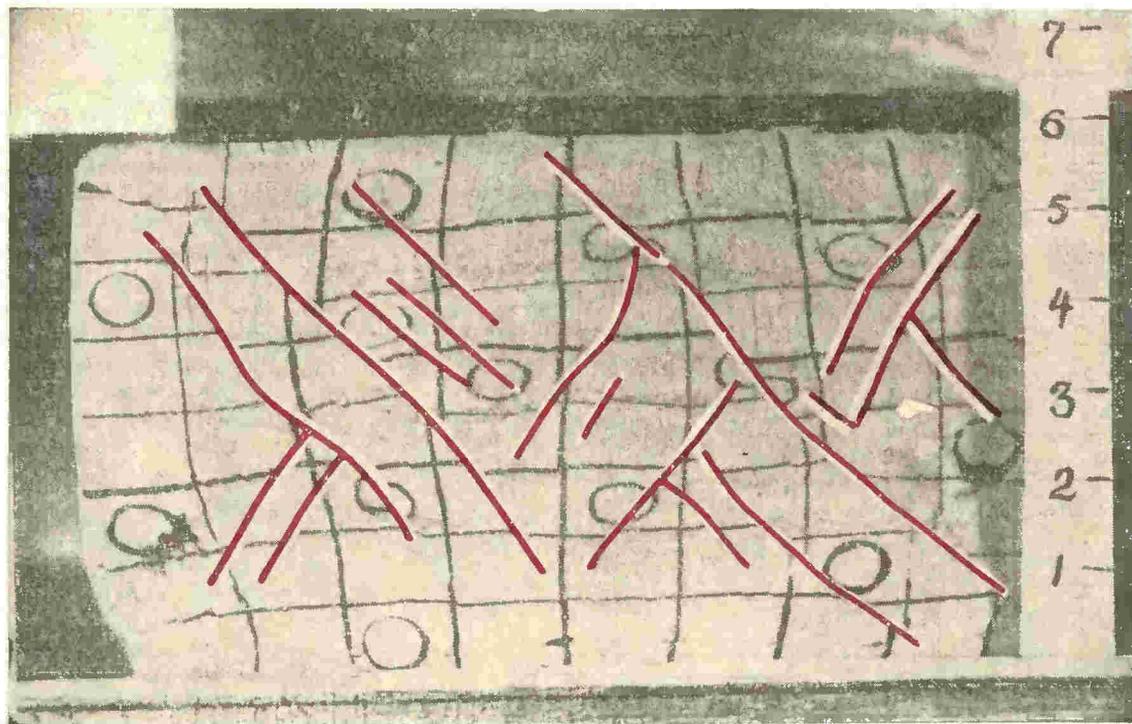


Рис. 3. Результаты опыта по сдавливанию образца глины. Вверху и внизу — стенки прибора, внутри которого помещались тонкие черные линии — контрольная сетка, нанесенная тушью на боковую поверхность образца до опыта, красные линии — трещины, возникшие в результате опыта. Ориентировка последних во всех случаях близка к 45° (по отношению к контрольным линиям)

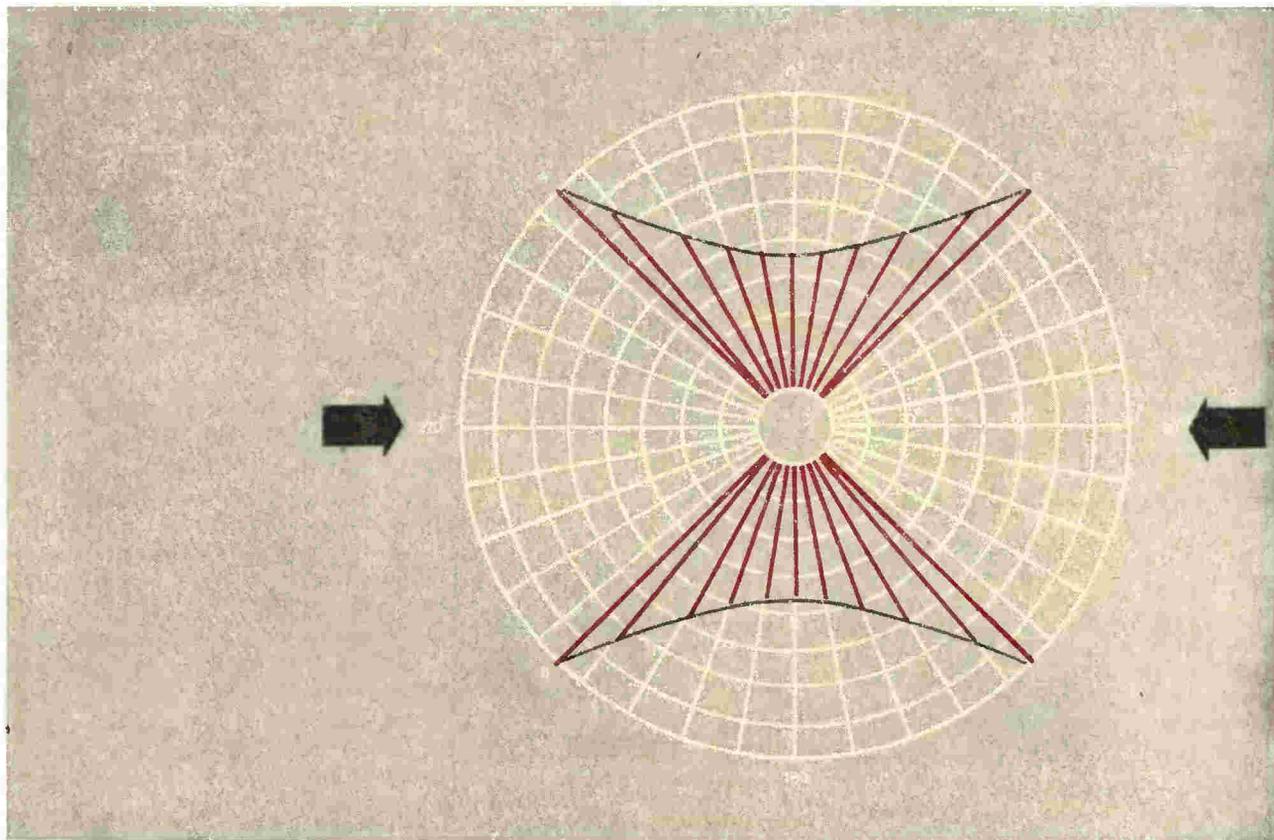


Рис. 4. Роза-диаграмма сходящихся деформаций (зависимость угла падения от азимута простирания). Если считать, что плоскость чертена — это некая горизонтальная поверхность, то плоскости AC и BD будут вертикальными, плоскость MN будет наклонена к горизонту (вправо или влево) под углом 45° , а все промежуточные плоскости будут обладать различными углами между 45 и 90° . Но все они обладают общим свойством — образуют угол в 45° с направлением давления P .

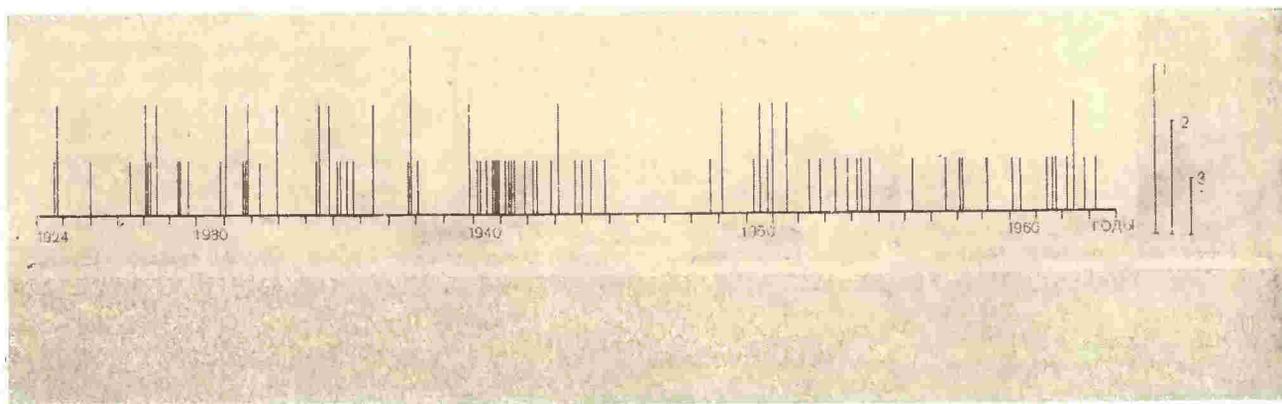


Рис. 5. График распределения сильных ($M \geq 5 \frac{1}{2}$) глубинных (100—300 км) землетрясений за период с 1924 по 1963 гг. Группы интенсивности: I группа (1), II группа (2) и III группа (3)

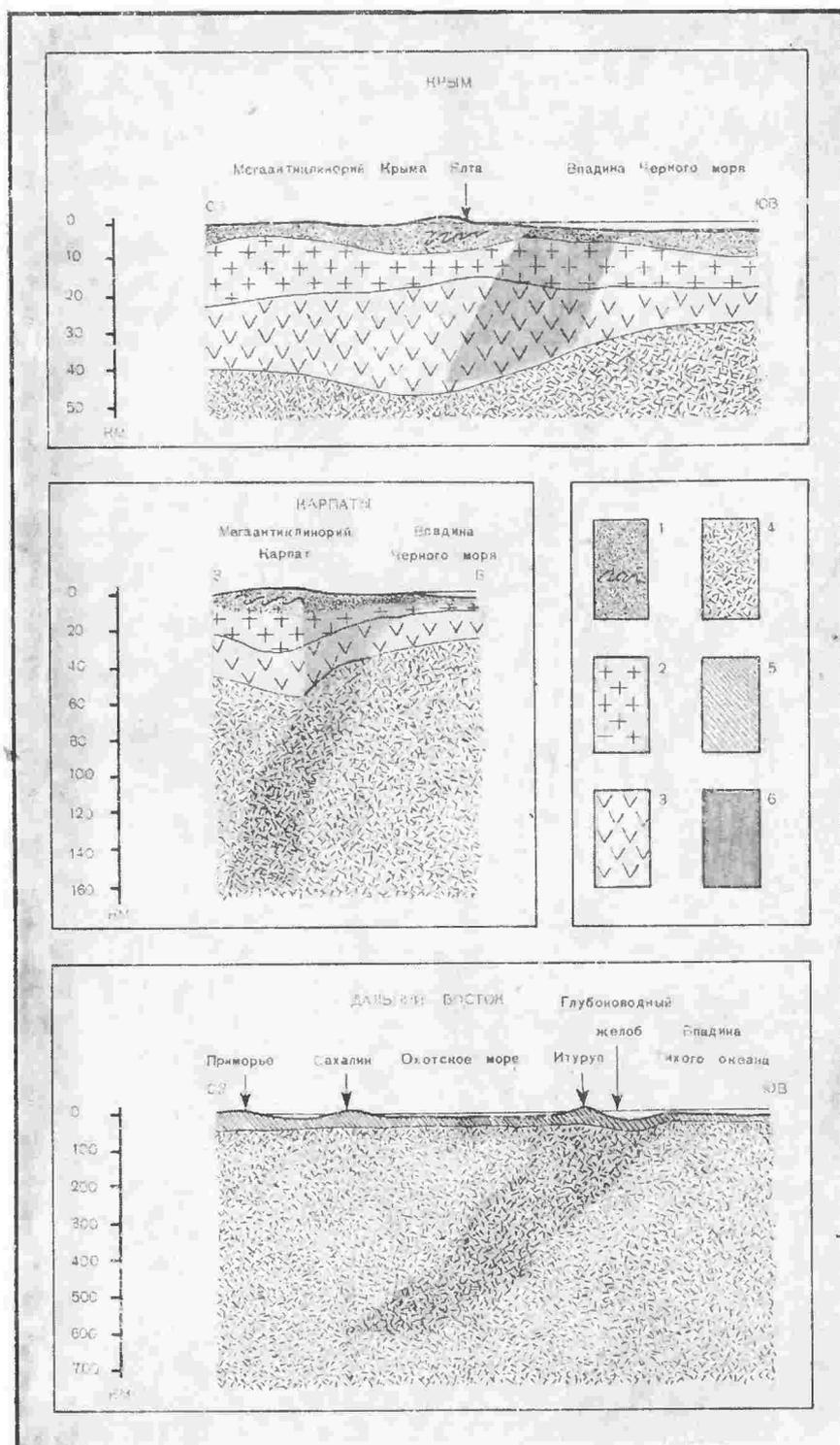


Рис. 6. Схематические разрезы через очаговые зоны Крыма (сверху), Карпат (посередине) и Дальнего Востока (снизу): 1 — осадочные породы, 2 — граничный слой, 3 — базальтовый слой, 4 — мантия, 5 — нерасчиленная земная кора, 6 — зоны концентрации очагов землетрясений. Очаговая зона Памира по своей конфигурации резко отличается от этих зон

очаги землетрясений регистрируются чаще, чем в других местах. Правда, по рисунку об этом судить нельзя, так как сколько бы толчков ни приходилось на одну точку, они все поглощаются кружком, соответствующим очагу максимальной магнитуды. Что касается энергии землетрясений, то именно здесь расположен единственный из отмеченных за 40 лет очаг I группы интенсивности (14.XI—1937 г., $h = 170$ км). В этом отношении показателем может служить суммарное количество энергии, выделившейся за рассматриваемый промежуток времени в форме землетрясений (или величина удельной сейсмической энергии, т. е. энергии, рассчитанной на 1 см^3 объема среды за 1 сек). Эти данные указывают на концентрацию энергии именно в центральной части фокальной зоны, т. е. опять на глубинах порядка 160—180 км.

В полосе, ограниченной уровнями 110—140 км ниже ур. м., землетрясения происходят реже и энергия их ниже. На этой глубине располагается так называемый волновод, или астеносфера, т. е. слой пониженных значений скорости упругих волн и пониженной вязкости (А. А. Лукк и И. Л. Нерсесов, 1967 г.). Это значит, что накапливающиеся в результате процессов тектогенеза напряжения могут здесь частично рассасываться путем пластического течения пород, что и снижает чисто сейсмические возможности волновода. Недавно В. А. Магницкий и В. И. Жарков (1967 г.) справедливо указали на то, что «с особенностями этого слоя могут быть связаны... особенности размещения и механизма землетрясений». По-видимому, это верно, но все же волновод не искажает общей картины распределения сил, вытекающих из закона скалывающих напряжений, т. е. не искажает общей конфигурации X-образной фокальной зоны.

Есть некоторые указания на существование и другого, более глубоко расположенного слоя пониженных скоростей — именно глубже 240 км. Этот уровень совпадает с нижней границей фокальной зоны. Глубже 240 км очаги почти не встречаются. В этом можно видеть анало-

гичное влияние физической обстановки, характеризующей волновод. Можно также полагать, что напряжения, ведущие к возникновению землетрясений, вообще ограничены в данном районе оболочкой, простирающейся до глубины 240 км.

Возникает и такой вопрос: если здесь условия возникновения и разрешения тектонических напряжений характеризуются простой изложенной выше схемой, то нельзя ли ожидать, что именно в этом районе обнаружатся признаки периодичности в появлении землетрясений? Известно, что поиски такой правильной повторяемости землетрясений составляют содержание многих специальных исследований, но обнадеживающих результатов пока нет. Слишком сложна тектоническая обстановка в обычных сейсмически активных районах, слишком много факторов воздействует одновременно на сейсмический режим, чтобы землетрясения возникали бы через равные промежутки времени. Но здесь, в мантии, на фоне очевидного преобладания одного поля сил, одного закона скальвающих напряжений, может быть, легче подметить какую-либо периодичность? Мы попытались проанализировать имеющиеся материалы по глубоким сильным землетрясениям описываемого района (рис. 5). Как показывает график, здесь можно выделить периоды (каждый охватывает в среднем 2 года), характеризующиеся усилением сейсмической деятельности и разделенные периодами (в среднем полугодовыми) относительного покоя. Моменты максимума появляются с периодом порядка три с половиной года, и период этот довольно хорошо выдерживается на протяжении всех 40 лет наблюдений. Не думаю, чтобы уже можно было с уверенностью говорить о реальности такого периода; вопрос нужно исследовать дальше. Но задача не кажется безнадежной и при успешном решении может открыть новые перспективы в сложной проблеме прогноза землетрясений.

И, наконец, последнее, на что мне хотелось бы обратить внимание, — это вопрос о конфигурации

фокальных зон вообще. На Памире, как показывает наш разрез, фокальная зона (см. рис. 1) образует ярко выраженную X-образную фигуру. Но в других районах дело обстоит, как правило, иначе. Если вычертить аналогичные разрезы через сейсмически активные участки Карпат, Крыма и Курило-Камчатской области (рис. 6), то окажется, что там очаги землетрясений укладываются в сравнительно широкие полосы, которые уходят довольно круто от поверхности вглубь с явно выраженным наклоном порядка 50—60°. В Крыму фокальная зона наклонена в сторону от континентального склона Черного моря в Горному Крыму, достигая глубины 40 км; на Карпатах — в сторону от передового прогиба к складчатой области и достигает глубин порядка 200 км, а на Дальнем Востоке — в сторону от глубоководного рва Тихого океана к берегам материка, простираясь вплоть до глубины в 600 км. Почему же фокальная зона Памира так отличается по своей конфигурации от других зон? Я вижу здесь влияние асимметрии тектонической обстановки.

Тектоника Карпат характеризуется поднятием их складчатого сооружения и надвиганием последнего на его же передовой прогиб. Это происходит в зоне контакта двух различных по своей природе, геологической истории и по строению коры областей — Русской платформы и складчатого сооружения Карпат. Центральная часть антиклинория Крыма также испытывает поднятие с одновременным надвиганием на южное, погребенное его крыло вдоль резко выраженного контакта двух, также тектонически совершенно различных зон: складчатого сооружения Крыма и впадины Черного моря. На Дальнем Востоке есть основание говорить о надвигании континентальной части Азии на структуры океанического дна на фоне глубоких различий не только в тектонике поверхностных частей, но и в строении коры.

В этих условиях — если возвратиться к закону скальвающих напряжений — реализуется, так ска-

зать, лишь одна ветвь конуса давлений, т. е. возникают скальвающие деформации лишь одной ориентировки — именно продольные (по отношению к складчатым нарушениям) деформации по преимуществу типа пологих падивгов с падением их сместителей в сторону висячего крыла. Возникновение трещин обратного падения, так сказать, противопоказано, точно так же как и возникновение крутых диагональных сдвигов. Это не значит, что они не могут возникать, но, во всяком случае, одна (указанная выше) система разрывных нарушений должна заметно преобладать, что мы и видим в действительности.

Фокальная зона Западного Памира и северо-восточного Афганистана находится в другой ситуации. Здесь нет коры океанического типа, которая находилась бы в контакте с корой континентального типа, нет непосредственного соседства платформы и складчатой зоны. Здесь мы находимся в пределах центральной части обширной складчатой зоны; поверхность Мохоровичича, т. е. подошва земной коры, опускается до глубины в 50—60, даже 70 км, и эта цифра выдерживается на больших пространствах; такой коре на поверхности соответствует ярко выраженная альпийская складчатая зона, а в глубине, в мантии, под сиалическим корнем — глубоко опущенная фокальная зона, развивающаяся в условиях единого поля напряжений, при значительной симметрии всей тектонической обстановки. Отсюда — равные возможности для проявления обеих «ветвей» конуса давлений с преобладанием продольных разрывов и отсюда же — правильная симметрия фигуры фокальной зоны.

В одной из работ (Л. М. Балакина, А. В. Введенская, Л. А. Мишарина, Е. И. Широкова, 1967 г.) говорилось: «Как современное развитие тектонических структур, так и возникновение землетрясений обусловлено одним и тем же полем упругих напряжений, создаваемым за счет процессов, протекающих внутри Земли». Изложенные нами факты подтверждают и в некоторой мере конкретизируют это положение.