

Е. С. ШТЕНГЕЛОВ

## ЗОНЫ НОВЕЙШЕГО И СОВРЕМЕННОГО РАЗДВИЖЕНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ

В результате появления методов измерения естественной напряженности массивов горных пород в последние годы установлено существование сложной плановой зональности современного напряженного состояния верхней части континентальной коры (Напряженное состояние..., 1973). Во многих районах выявлены горизонтально направленные сжимающие напряжения, значительно превышающие расчетные величины бокового распора от веса пород. Поскольку направления этих напряжений всегда перпендикулярны к осям горноскладчатых сооружений, подавляющее большинство исследователей рассматривает их как остаточные тектонические напряжения, обусловленные горизонтальным сжатием земной коры при альпийском (или более раннем) орогенезе. Отличаясь выдержанностью азимутальной ориентировки, эти напряжения характеризуются резкой площадной изменчивостью величин. Кроме того, иногда в непосредственной близости к полям интенсивных горизонтальных напряжений, нередко отмечаются участки почти полного их отсутствия. Эти участки, где единственным источником напряжений является вес столба пород (геостатические поля), как правило, совпадают с трещинными зонами (Булин, 1973). Имеются данные, свидетельствующие о существовании весьма сложной и дробной современной геодинамической зональности, заключающейся в чередовании полей тектонического сжатия и геостатических зон или участков, где фиксируются растягивающие напряжения (Булин, 1973).

### МЕТОДИКА ДЕТАЛЬНОГО КАРТИРОВАНИЯ ТРЕЩИННЫХ ЗОН

Исследования, благодаря которым была разработана методика картирования современной геодинамической зональности, первоначально преследовали чисто гидрогеологические и инженерно-геологические цели и состояли в разработке методического комплекса для выявления зон повышенной трещиноватости и закарстованности пород. В процессе этих многолетних исследований, выполнявшихся на ряде эталонных участков в Крыму и Северо-Западном Причерноморье, основное внимание уделялось методам изучения породных массивов в условиях естественного напряженного состояния: геоморфологическим, гидрогеологическим, инженерно-геологическим и геофизическим.

Полученные результаты подтвердили достаточно высокую эффективность решения рассматриваемой задачи путем построения карт густоты прямолинейных участков эрозионной сети и других геоморфологических линеаментов на аэрофотоснимках и крупномасштабных топокартах. Этот метод, как известно, успешно применялся рядом исследователей (Миркин, 1968; Горбунов и др., 1977) для выявления трещинных зон. Нами опробовались различные варианты подсчета густоты линеамен-

тов. Наиболее эффективным оказался подсчет с помощью круглой палетки площадью  $1 \text{ км}^2$  (в масштабе карты или аэрофотоснимка), перемещаемой по квадратной сетке  $0,5 \times 0,5 \text{ км}$ . В районах развития литологически однородных толщ (за исключением территорий развития открытого карста) такой подсчет обеспечивает достаточно надежное выявление трещинных зон. Коэффициенты корреляции между густотой линеаментов и количественными показателями трещиноватости пород (коэффициенты фильтрации, водопроницаемость, удельные дебиты скважин, удельное водопоглощение промывочной жидкости при бурении), рассчитанные для 32 площадей, оказались равными  $0,38-0,86$ .

Гидрогеологические и инженерно-геологические данные о площадной изменчивости фильтрационных и физико-механических свойств массивов однородных плотных пород в большинстве случаев надежно характеризуют плановые вариации интенсивности открытой трещиноватости. Однако, поскольку скважины и другие пункты опробования располагаются обычно по редкой и неравномерной сети, детальное картирование трещинных зон по этим данным невозможно.

Анализ результатов применения на эталонных участках различных геофизических методов показал возможность оконтуривания зон трещиноватости с помощью сейсморазведки и электроразведки. В первом случае поля повышенной трещиноватости отмечаются увеличением коэффициента затухания упругих колебаний и уменьшением скоростей сейсмических волн. Из геоэлектрических особенностей трещиноватых массивов наиболее показательно увеличение коэффициента электрической анизотропии, определяемого с помощью круговых вертикальных зондирований на больших разносах (рис. 1). Перечисленные геофизические признаки трещинных зон известны и нередко применяются для выявления последних.

Существенно новым результатом выполненных нами исследований является следующий: в зонах открытой трещиноватости горные породы отличаются относительно пониженной гамма-активностью. Контрастность отрицательных гамма-аномалий, отмеченных в пределах трещинных зон, особенно значительна в карбонатных породах. В центральных частях наиболее крупных зон степень уменьшения гамма-активности известняков достигает  $80-90\%$  величины, присущей тем же отложениям на участках отсутствия открытой трещиноватости. В породах другого состава относительная контрастность гамма-минимумов в трещинных зонах менее значительна, однако и они вполне фиксируемы с помощью современных геологических радиометров и каротажных зондов. Естественно, что гамма-метрическое картирование трещинных зон возможно только на основе измерений активности литологически однородных и регионально выдержанных толщ коренных пород. Замеры должны выполняться с максимальной точностью (густая и по возможности равномерная сеть, тщательное эталонирование аппаратуры, учет флуктуаций космического излучения, многократность замеров на каждой точке с последующим вычислением средних значений). Особенности применения различных гамма-методов для картирования трещинных зон рассмотрены в наших работах (Штенгелов, 1976, 1977).

Достоверность гамма-метрического метода выявления зон трещиноватости многократно проверялась нами в различных районах СССР. Повсеместно была установлена четкая прямая связь между степенью уменьшения гамма-активности пород и количественными показателями их трещиноватости, в частности их трещинной водопроницаемостью (рис. 1). Коэффициенты корреляции между уменьшением гамма-активности пород и коэффициентами фильтрации, удельными дебитами скважин, поглощением раствора, провалами бурового инструмента, рассчитанные для 43 площадей, оказались равными  $0,48-1,00$ . Выполненная рядом геологических и проектных организаций (Укрюжгипроводхоз,

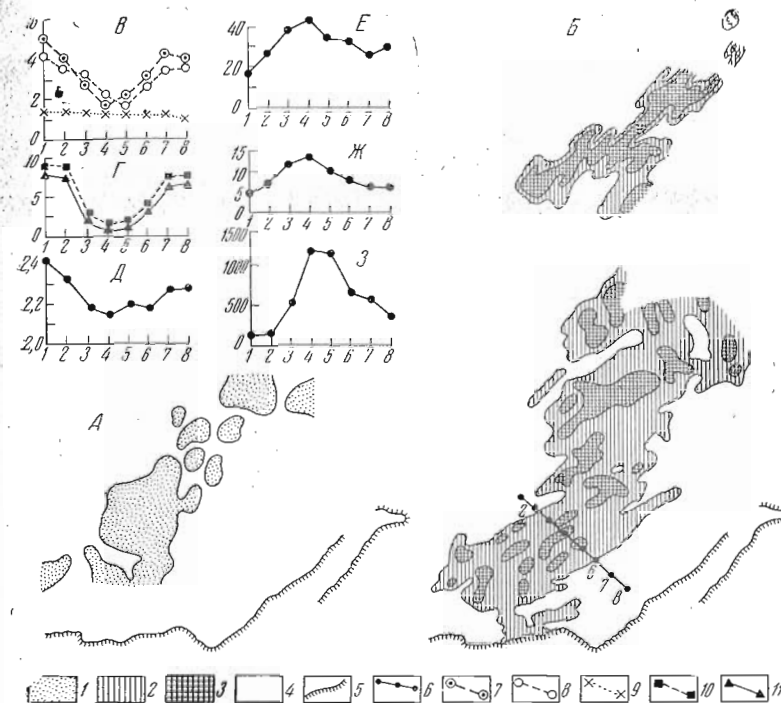


Рис. 1. Карайимская трещинная зона в Горном Крыму

А — положение зоны по данным КВЭЗ (по В. И. Литвинову), Б — положение зоны по данным детальной гамма-съемки верхнеюрских известняков, В — изменение гамма-активности известняков по профилю вкрест зоны,  $\text{мкр/ч}$ , Г — изменение содержания в известняках нерастворимого остатка и глинистого материала, %, Д — изменение объемной массы известняков,  $\text{г/см}^3$ , Е — изменение плотности поверхностных карстовых форм,  $\text{шт/км}^2$ , Ж — изменение плотности подземных карстовых форм,  $\text{шт/км}^2$ , З — изменение коэффициента фильтрации известняков по крупным образцам,  $\text{л/сутки}$

1 — участки с коэффициентом электрической анизотропии более 2 (полуразнос 350 м), 2 — с гамма-активностью известняков по данным съемки 2—3  $\text{мкр/ч}$ , 3 — менее 2  $\text{мкр/ч}$ , 4 — с коэффициентом электрической анизотропии менее 2 (А) и гамма-активностью более 3  $\text{мкр/ч}$  (Б), 5 — бровка плато, 6 — положение профиля и номера пикетов, 7 — гамма-активность известняков по данным съемки, 8 — по лабораторным определениям на крупных образцах, 9 — по лабораторным определениям на небольших образцах, 10 — общее содержание нерастворимого остатка, 11 — содержание глинистой фракции

Новомосковская и Крымская геологоразведочные экспедиции) проверка результатов гамма-метрических исследований путем бурения контрольных скважин также показала надежность метода. Его эффективность подтверждается и сопоставлением получаемых результатов с картами густоты карстовых форм в районах развития водорастворимых пород и данными выявления трещинных зон с помощью электроразведки, в частности КВЭЗ (рис. 1). Сравнение карт положения трещинных зон, оконтуренных гамма-методом, с результатами морфометрического выявления последних также обнаруживает в большинстве случаев хорошую сходимость (рис. 2).

Изучение химического состава пород в пределах гамма-минимумов и вне их, выполненное по крупным монолитам, показало, что в первом

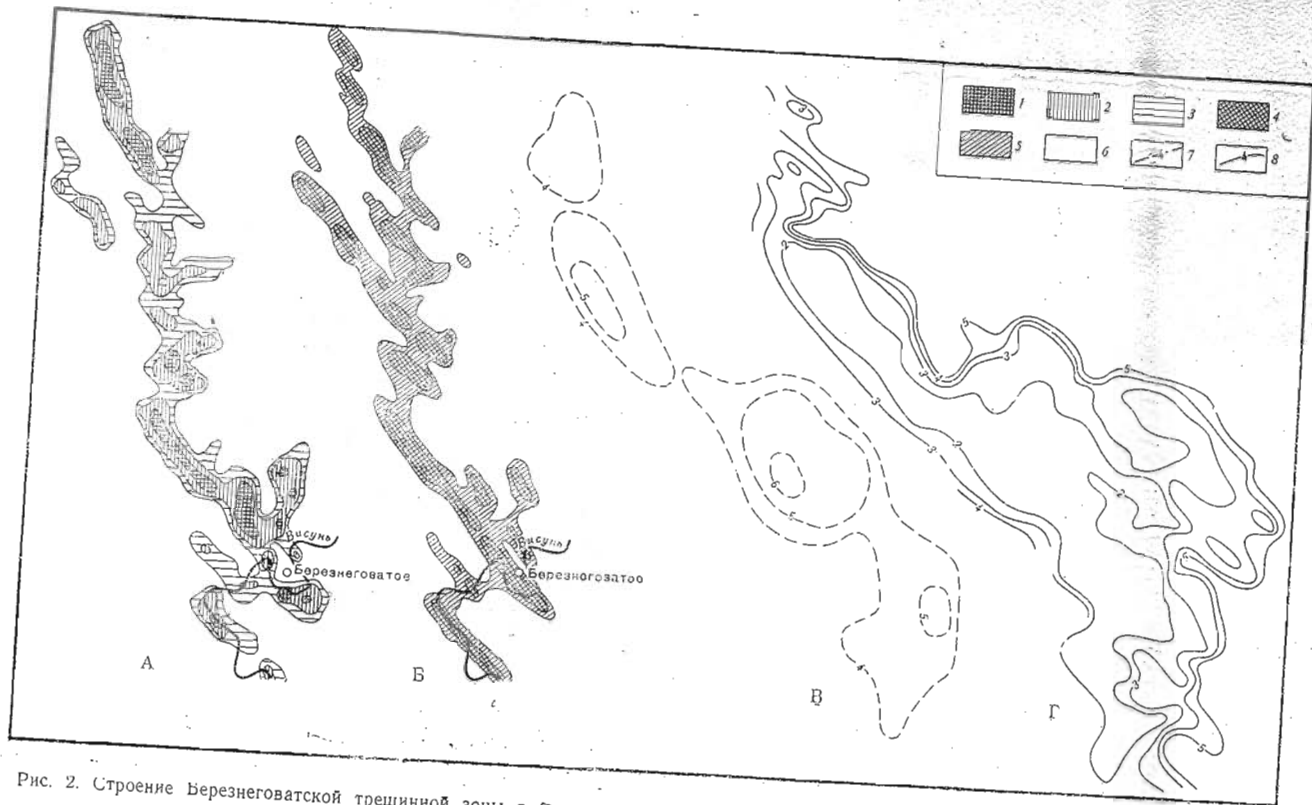


Рис. 2. Строение Березнеговатской трещинной зоны в Северо-Западном Причерноморье (А, Б) и Долгоруковской трещинной зоны в Крыму (В, Г) по данным морфометрического анализа и гамма-съемки  
 1 — участки густоты геоморфологических линейментов 2—2,5 км/км<sup>2</sup>, 2 — 2,5—3,5 км/км<sup>2</sup>, 3 — более 3,5 км/км<sup>2</sup>, 4 — с гамма-активностью неогеновых известняков 3—5 мкр/ч, 5 — 5—7 мкр/ч, 6 — густоты линейментов менее 2 км/км<sup>2</sup> (А) и с гамма-активностью известняков более 7 мкр/ч (Б), 7 — изолинии густоты линейментов, км/км<sup>2</sup>, 8 — изолинии гамма-активности верхнеюрских известняков, мкр/ч

случае породы отличаются пониженным содержанием тонкодисперсного терригенного и органогенного материала, который, как известно, является главным источником гамма-активности большинства осадочных и метаморфических пород. При этом анализ малых образцов, характеризующих межтрещинную матрицу породы, показывает, что содержание тонкодисперсного терригенного материала и гамма-активность во всех случаях практически одинаковы (рис. 1). Таким образом, несомненно, что уменьшение содержания тонкодисперсного материала в породах на участках развития открытой трещиноватости происходит за счет трещин. Естественно предположить, что это уменьшение обусловлено выносом тонкодисперсного материала из трещин в процессе фильтрации подземных вод, особенно в верхней гидродинамической зоне, где трещинная фильтрация происходит вертикально вниз (инфильтрация и инфилюция атмосферных осадков). Тот факт, что из массивов трещиноватых и закарстованных пород выносятся подземными водами на поверхность и в нижние гидродинамические зоны большие объемы пелитового и алевроитового материала, хорошо известен гидрогеологам (Штенгелов, 1976).

Выполненные исследования показывают, что в условиях литологической однородности пород гамма-метод обеспечивает исключительную точность картирования трещинных зон. Контуры тех же зон по картам густоты геоморфологических линейментов обычно более расплывчаты, особенно в карстовых районах (рис. 2, Б).

Гамма-метод, отличаясь высокой точностью, значительно уступает морфометрическому в отношении экспрессности и экономичности. Это в особенности относится к районам с плохой геологической обнаженностью, где он может применяться только в виде шпуровой гамма-съемки, пенетрационного или скважинного гамма-каротажа. Если в районе уже имеются закарстованные скважины (например, сеть взрывных сейсморазведочных скважин), выделение трещинных зон возможно с использованием каротажных диаграмм прошлых лет, однако неточность гамма-каротажа большинства скважин требует специальных приемов обработки, и детальность оконтуривания зон трещиноватости снижается.

### О ПРИРОДЕ ТРЕЩИННЫХ ЗОН

Значительный объем гамма-метрических и морфометрических исследований, выполненных нами в период с 1973 по 1977 г., позволил изучить расположение и строение трещинных зон во многих районах СССР (Крым, Северо-Западное Причерноморье, Карпаты, Донбасс, Кольский полуостров, Горьковское Поволжье, Пермское Прикамье, Предкавказье и Закавказье, Мангышлак, ряд районов Средней Азии, юг Западной Сибири, Забайкалье, Камчатка, Сахалин). В результате этих работ установлено, что все перечисленные районы, несмотря на тектонические и другие отличия, характеризуются явным, бросающимся в глаза сходством взаимоположения и строения трещинных зон. Повсеместно проявляются следующие их особенности: ширина — от нескольких сотен метров до нескольких километров (при ширине разделяющих их блоков нетрещиноватых пород от 5 до 30 км); приуроченность к двум, приблизительно перпендикулярным направлениям, из которых одно является главным, благодаря чему крупные зоны расположены взаимопараллельно (или веерообразно — см. ниже); соответствие главных направлений трещинных зон азимутам ближайших горноскладчатых сооружений; преобладание северо-восточных и северо-западных направлений; отчетливо выраженная кулисовидность строения.

Для выяснения природы выявленной зональности чрезвычайно важны результаты сопоставления положения трещинных зон с данными натуральных тензометрических измерений (Штенгелов, 1977). Это сопо-

ставление, выполнявшееся на ряде участков в Донбассе, Львовско-Во-  
 льнском бассейне, на Кольском полуострове и в Западном Приуралье  
 выявило следующие закономерности: 1) перпендикулярность направ-  
 лений основных трещинных зон преобладающим направлениям гори-  
 зонтальных тектонических напряжений; 2) приуроченность всех пунк-  
 тов, где зафиксированы вышеупомянутые напряжения, к блокам не-  
 трещиноватых пород, разделяющим трещинные зоны; 3) отсутствие го-  
 ризонтальных тектонических напряжений сжатия в пределах трещин-  
 ных зон. Не менее показательны результаты сопоставления положения  
 трещинных зон и пунктов, где отмечены косвенные признаки тектони-  
 ческой напряженности породных массивов (горные удары, стреляние  
 пород, углегазовые выбросы, аномально-высокие давления пластовых  
 флюидов). Все они также оказались приуроченными к блокам нетре-  
 щиноватых пород, обычно к их центральным частям, и никогда не от-  
 мечаются в пределах трещинных зон (Штенгелов, 1977).

Приведенные данные позволяют высказать предположение, что уча-  
 стки нетрещиноватых пород являются блоками горизонтального текто-  
 нического сжатия, а трещинные зоны — узкими полями растягивающих,  
 также направленных горизонтально напряжений. Подобное объяснение  
 природы трещинных зон высказывается и другими исследователями,  
 например в работе (Горбунов и др., 1977), написанной по данным мор-  
 фометрического выявления трещинных зон на Кольском полуострове.  
 Закономерен вопрос о механизме образования подобной зональности  
 напряженного состояния земной коры. В принципе возможны три ва-  
 рианта: 1) зоны сжатия и растяжения сформированы одновременно,  
 2) зоны сжатия возникли позже, 3) раньше зон растяжения. Учитывая  
 горизонтальность сжимающих тектонических напряжений, выдержан-  
 ность их направлений и, что особенно важно, большую частоту чередо-  
 вания зон сжатия и растяжения, первые два варианта следует признать  
 маловероятными. Гораздо более естественно третье объяснение: зоны  
 растяжения представляют собой вторичные образования, разбившие  
 единое в прошлом поле общего горизонтального сжатия на большое  
 количество разобращенных фрагментов, в пределах которых в породах  
 сохраняются нерелаксированные остаточные напряжения.

Мы уже приводили данные, благодаря которым многие исследова-  
 тели связывают возникновение сжимающих тектонических напряжений,  
 фиксируемых в горных породах, с альпийским или более ранним оро-  
 гезисом. Естественно предположить, что формирование зон растяжения  
 связано с постальпийским этапом геологической истории и продолжа-  
 ется поныне. Ниже приводятся данные, показывающие обоснованность  
 этого предположения.

Прежде всего следует указать на результаты сопоставления поло-  
 жения трещинных зон с данными о современных горизонтальных дви-  
 жениях земной поверхности. К сожалению, до последнего времени изу-  
 чению этих движений не уделялось должного внимания, в связи с чем  
 сведения о них сравнительно немногочисленны, основаны на редких  
 сетях и, как правило, краткосрочны. Тем не менее по районам, где нам  
 удалось выполнить сопоставление результатов картирования зон раз-  
 движения с геодезическими данными, связь горизонтальных смещений  
 реперов с геодинамической зональностью очевидна (рис. 3). Убедите-  
 лен материал по Закарпатью и району Газли (Мельничук, 1975; Писку-  
 лин, 1978), где установлено смещение геодезических пунктов на СВ и  
 ЮЗ (рис. 3, А, Б) от детально прослеженных нами трещинных зон  
 (Штенгелов, 1979). Расхождение геодезических пунктов в разные сто-  
 роны от линейно вытянутых зон обнаружено благодаря повторным три-  
 ангуляциям на Камчатке (Геологические данные..., 1978), в районах  
 вулкана Сикурадзима в Японии (Никонов, 1978) и грабена Дикси в  
 США (Meade, 1963). Во многих районах установлена однонаправлен-

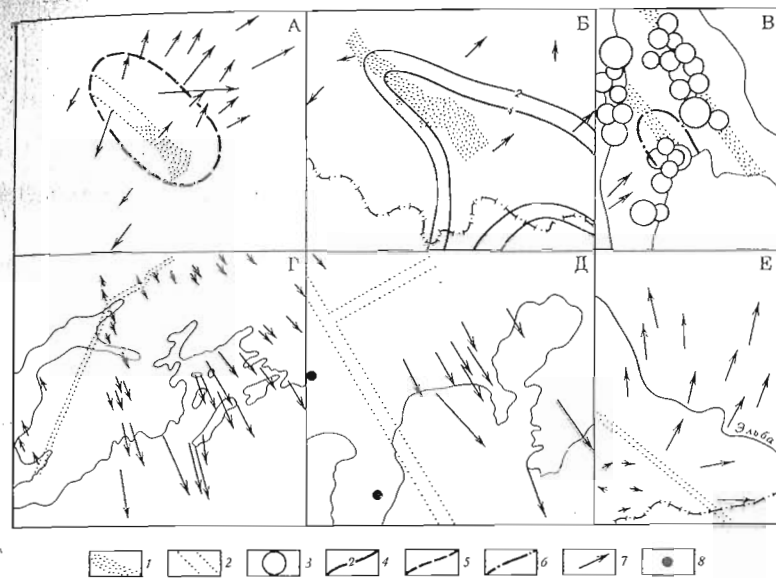


Рис. 3. Связь положения трещинных зон и характера горизонтальных движений зем-  
 ной коры в районе месторождения Газли (А), в Закарпатье (Б), на юге Сахалина (В),  
 в районе Аляскинского залива (Г), залива Сагами в Японии (Д) и в бассейне Эльбы (Е)  
 1 — трещинные зоны, прослеженные, 2 — предполагаемые, 3 — эпицентры землетрясе-  
 ний с  $M \geq 4,5$  и  $I_0 \geq 5$  (по Новому каталогу), 4 — изолинии плотности глубинных сейсмо-  
 дислокаций (по Ю. К. Шукину); плейстоценовые области: 5 — Газлийского землетря-  
 сения 8.IV.1976 г., 6 — Анивского землетрясения 10.V.1964 г., 7 — направления и отно-  
 сительная (в пределах каждого участка) скорость смещения геодезических пунктов  
 (по В. А. Пискулину, М. И. Мельничуку, В. К. Захарову, Ю. А. Мешерякову, В. В. Да-  
 нилову и А. Лангу), 8 — пункты, не испытывавшие смещения (по В. В. Данилову)

ность горизонтальных смещений геодезических пунктов с постепенным  
 или скачкообразным возрастанием скорости смещения, что является  
 бесспорным признаком современного расширения этих участков земной  
 коры. Кроме районов, показанных на рис. 3, Г, Д, Е, такой характер  
 современных горизонтальных движений земной коры наблюдается в  
 Армении (Казанчян, 1969), на о. Кюсю в Японии. Там, где есть матери-  
 ал о положении трещинных зон, но данные о горизонтальных движе-  
 ниях не имеют площадного характера, обращает на себя внимание взаи-  
 моперпендикулярность векторов смещения и трещинных зон (рис. 3, В;  
 6, А).

К числу признаков современного раздвижения континентальной ко-  
 ры следует отнести и современное тектоническое трещинообразование.  
 Оно подробно изучено в Центральных Кызылкумах (Ибрагимов и др.,  
 1973), где наблюдается возникновение и расширение открытых (с зия-  
 нием до 5 м и более) вертикальных трещин, образующих полосовидные  
 зоны шириной 300—500 м, ориентированные на СВ 50° и СЗ 320°  
 (рис. 6, Б). Современное тектоническое трещинообразование описано  
 также для Паркентского района Узбекистана, Ташкентского геодина-  
 мического полигона, Туркмении, Казахстана, Южного Урала, Забай-  
 калья, а также СССР, Австрии, США и других стран. Линейные зоны  
 сгущения тектонических трещин четвертичного, в том числе голоцено-  
 вого, возраста описаны на Урале Н. Д. Будановым (1957). В Подмос-  
 ковье тектоническая трещиноватость четвертичных отложений изучена  
 А. А. Апродовой (1969).

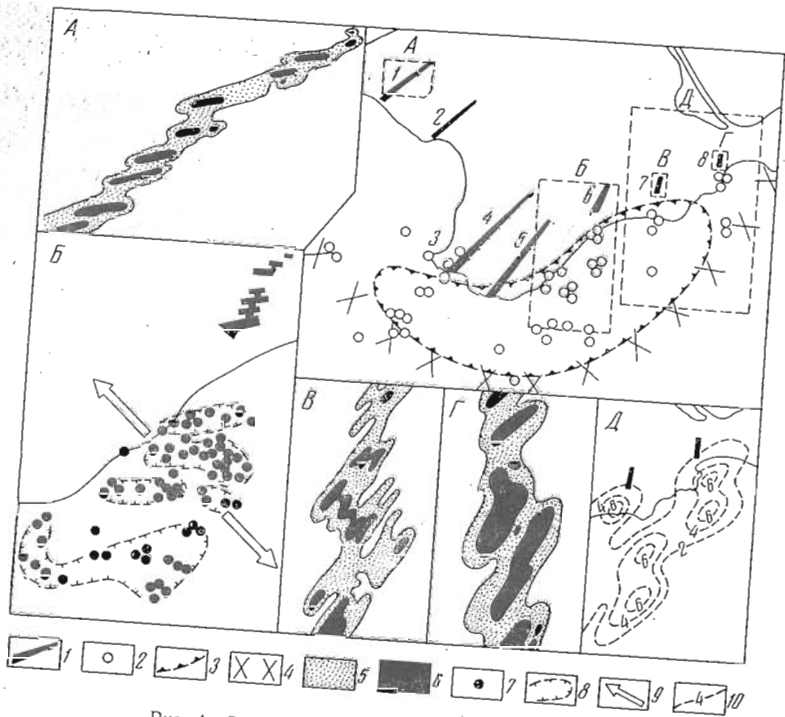


Рис. 4. Строение Крымского вьера раздвижения

1 — положение и номера крупнейших зон раздвижения (1 — Донузлавская, 2 — Северо-Сасыкская, 3 — Гераклеяская, 4 — Симферопольско-Балаклавская, 5 — Скельская, 6 — Карабийско-Ялтинская, 7 — Агармышско-Судацкая, 8 — Феодосийская), 2 — эпицентры наиболее сильных землетрясений 1853—1973 гг. (по Б. Г. Пустовитенко), 3 — гравитационный минимум (по Ш. А. Адамия и др.), 4 — вероятное положение дугообразного сдвига, 5 — участки интенсивной, 6 — весьма интенсивной трещиноватости, 7 — эпицентры землетрясений 1927 г. (по Б. Г. Пустовитенко), 8 — участки скопления эпицентров, 9 — ориентировка растягивающих сил в очагах землетрясений (по Б. Г. Пустовитенко), 10 — изолинии плотности глубинных сейсмодислокаций (по Ю. К. Шуккину)

О продолжающемся раздвижении континентальной коры свидетельствуют и сейсмологические данные. Следует отметить, что сопоставление этих данных с результатами наших исследований встречает определенные затруднения. Они обусловлены прежде всего характерной для многих районов неточностью локализации эпицентров землетрясений. Следует учитывать также непродолжительность (в геологическом масштабе времени) инструментальных сейсмологических наблюдений. Однако в случаях, когда изучение современной геодинамической зональности выполнялось в районах с хорошей сейсмологической изученностью, отмечается явное совпадение положения сейсмофокальных зон с зонами современного раздвижения или их продолжениями (рис. 3, Б, В; 4). Показательно и наблюдающееся соответствие ориентировки изосейст направлениям зон раздвижения (рис. 3, А, В). В ряде районов установлена перпендикулярность близгоризонтальных растягивающих усилий в очагах землетрясений азимутам трещинных зон (точнее, азимутам образующих эти зоны кулис) (рис. 4, Б). Приведенные факты и ряд других данных, частично рассмотренных в работах (1979, 2), а частично рассматриваемых в следующем разделе статьи, позволяют считать причиной континентальных землетрясений формирование зон раздвижения. Естественно, что происходящие при

этом разрывы блоков остаточного сжатия могут сопровождаться сейсмическими толчками лишь в тех районах и на тех глубинах, где выдерживаются следующие условия: 1) раздвижение происходит достаточно быстро (в противном случае оно компенсируется безразрывным вязкопластичным течением или медленным постепенным растрескиванием), 2) растяжение затрагивает породы хрупкие (малопластичные), но имеющие достаточно высокую прочность на растяжение, благодаря чему их разрыву предшествует некоторый период упругого растяжения. Землетрясение происходит в момент трещинного разрушения породы и мгновенного снятия накопленных в ней растягивающих напряжений. Одновременно в объеме породы, прилегающей к разрыву, происходит высвобождение остаточных горизонтальных сжимающих напряжений, а также сжатых в порах и других пустотах газов и жидкостей (главным образом газонасыщенных термальных растворов), которые, расширяясь, постушают в приповерхностную часть геологического разреза и на поверхность.

Естественно, что условия, благоприятные для возникновения землетрясений (высокая скорость формирования трещинных зон и наличие прочных пород), наблюдаются главным образом в районах, недавно испытавших орогенное сжатие и характеризующихся значительной напряженностью пород (увеличивающей их упругость), интенсивным сжатием пластовых флюидов, развитием магматических, метаморфических и других массивных пород. Эти районы, как известно, и отличаются максимальной сейсмичностью. Нередко отмечается прямая пропорциональность между сейсмической активностью и степенью смятия земной коры (в частности, ее толщиной).

Завершая краткий обзор данных о связи сейсмичности с посторогенным раздвижением континентальной коры, необходимо подчеркнуть следующее. Во-первых, очаги землетрясений маркируют только те зоны раздвижения (вернее, только те их участки), которые активно формируются в настоящее время. Во-вторых, в силу недостаточной точности определения координат эпицентров детальное картирование современной геодинамической зональности по сейсмологическим данным, как правило, невозможно. Они могут использоваться только для мелкомасштабного картирования наиболее крупных раздвиговых зон. В-третьих, анализ данных о сейсмологических определениях усилий, действующих в очагах землетрясений, показывает, что главные усилия всюду отражают плановую картину остаточных тектонических напряжений, наблюдаемых в данном районе и высвобождающихся при формировании трещинных зон раздвижения. При этом если трещинная зона перпендикулярна горноскладчатому сооружению и, следовательно, перпендикулярна ориентировке орогенного сжатия, при ее формировании происходит высвобождение сжимающих напряжений, и в очагах землетрясений фиксируется близгоризонтальное сжатие вкрест зоны (сейсмофокального поля). Если трещинная зона перпендикулярна горноскладчатому сооружению и параллельна ориентировке сжимающих напряжений, получается альтернативное решение (горизонтальное растяжение вкрест трещинной зоны) (рис. 4, Б). Это необходимо учитывать при использовании сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений для выяснения направлений сейсмогенных трещинных зон.

#### ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ЗОНАЛЬНОСТИ НОВЕЙШЕГО И СОВРЕМЕННОГО РАЗДВИЖЕНИЯ КONTИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ

Наличие зон раздвижения земной коры устанавливается всюду, где проводится изучение плановых вариаций густоты открытой трещиноватости. Анализ положения этих зон показывает, что раздвижение затрагивает всю континентальную кору независимо от возраста складчатости отдельных ее участков. Это доказывается, во-первых, идентичностью

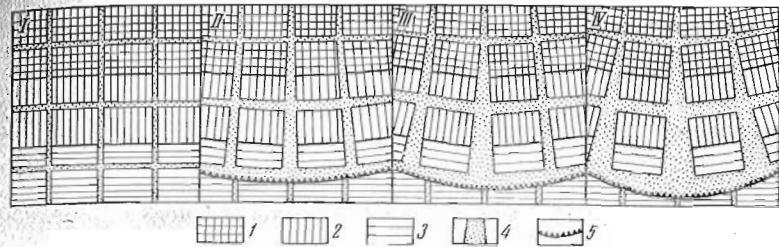


Рис. 5. Схема веерообразного раздвижения земной коры  
1 — земная кора большой, 2 — средней, 3 — малой мощности, 4 — зона раздвижения, 5 — дугообразный сдвиг

районах веерообразности. Наиболее полно она изучена нами в южной части Крымского полуострова (Штенгелов, 1979<sub>2</sub>). Ориентировка наиболее крупных раздвиговых зон этого района с запада на восток постепенно и закономерно изменяется от ВСВ 55—60° до субмеридиональной (Агармышско-Судакая — ССВ 12°, Феодосийская — ССЗ 350°). Все зоны расширяются на юг, в сторону моря (рис. 4), что особенно относится к наиболее активной в настоящее время (судя по ее сейсмичности) Карабийско-Ялтинской зоне. Левая кулисовидность трещинных зон Крымского веера, выявляемая при их гамма-метрическом картировании на суше, прослеживается и в шельфовых продолжениях некоторых из них в виде полей сгущения эпицентров землетрясений (рис. 4, Б) или повышенной плотности сейсмических линий Ю. К. Щукина (рис. 4, Д).

Другим детально изученным районом, где проявляется веерообразность расположения трещинных зон, является Северо-Западное Причерноморье (Штенгелов, 1979<sub>2</sub>). Этот веер, названный нами Одесским, так же как и Крымский, раскрыт на юг, в сторону Черного моря.

Веерообразное расположение зон раздвижения отмечается во многих других районах СССР, например в Средней Азии, на юге Западно-Сибирской плиты, на севере Саяно-Алтайской сейсмической области, на Кольском полуострове (Штенгелов, 1979<sub>2</sub>), на Камчатке. Тектоническое строение этих районов различно, однако они имеют одну общую черту: направленное изменение толщины земной коры. Расширение и веерообразное расхождение трещинных зон всегда отмечается в сторону уменьшения ее толщины. Это обстоятельство позволяет считать причиной веерообразности раздвижения земной коры различную скорость формирования трещинных зон на участках толстой и тонкой коры. В последнем случае их формирование происходит быстрее, так как тонкая земная кора обладает меньшей прочностью. Поэтому трещинные зоны, азимуты которых близки к направлению утоньшения коры, испытывают в эту сторону постепенное расширение, а перпендикулярные им зоны приобретают дугообразные очертания (рис. 5). Одна из этих дугообразных зон на внешней границе веера становится зоной вращательного сдвига, отделяющей интенсивно раздвигающуюся часть веера от нераздвигающейся или слабо раздвигающейся коры за пределами веера.

Геодезические данные, подтверждающие реальность предложенного объяснения причин веерообразного расположения трещинных зон на перифериях горноскладчатых сооружений и континентальных окраинах, имеются по западной части Средней Азии, где, судя по положению зон максимального сгущения эпицентров землетрясений, наблюдаются два веера трещинных зон: северный и южный (рис. 6).

Южный состоит из нескольких крупных трещинных зон (вернее, поясов концентрации трещинных зон), расположенных субширотно и

раздвиговых зон в смежных районах, отличающихся по тектоническому строению. Так, во всей южной части Европейской территории СССР, включая Скифскую плиту и альпийские сооружения Крыма и Восточных Карпат, четко преобладают два направления раздвиговых зон: СВ 40—60° и СЗ 300—330°. Во-вторых, в ряде случаев выявляются крупные раздвиговые зоны, пересекающие тектонически разновозрастные участки. Такова, например, Балаклавско-Симферопольская зона в Крыму (рис. 4). Наконец, местами выявлены единые, закономерно построенные системы зон раздвижения, включающие геотерогенные в тектоническом отношении районы. Например, Крымский веер раздвижения занимает альпийский антиклинарий и западную часть энгерцинской Скифской плиты (рис. 4), Одесский веер включает юго-запад Русской платформы и север Добруджи (Штенгелов, 1972<sub>2</sub>).

Большинство зон раздвижения выражено геоморфологически (Комарова, Штенгелов, 1977). К ним обычно приурочены речные долины (рис. 2, А, Б) и другие линейные депрессии рельефа: озера, лиманы, заливы, безводные впадины аридных районов. Следует отметить, что факт повышенной трещиноватости пород, в том числе и глубокозалегающих, в пределах почти всех речных долин хорошо известен благодаря геофизическим, гидрогеологическим и инженерно-геологическим исследованиям, в связи с чем большинство специалистов рассматривает линейные заложения речных долин как дисъюнктивные нарушения или зоны концентрации планетарной трещиноватости.

Таким образом, анализ расположения линейных отрицательных форм рельефа может использоваться для предварительной оценки положения раздвиговых зон в неизученных районах. Однако такая оценка во многих случаях оказывается весьма приблизительной, а иногда может приводить к ошибочным результатам. Во-первых, все молодые, недавно заложившиеся зоны раздвижения, а также те из них, которые находятся в карстовых районах, обычно не выражены в рельефе или выражены в виде полей сгущения карстовых форм, которые почти не отражаются на топокартах. Во-вторых, формирование геоморфологических депрессий, в частности речных долин, определяется сложным комплексом факторов (климат, топография, литология, условия залегания пород и другие), многие из которых скрадывают рельефообразующую роль зональности раздвижения. Так, в западной части Горного Крыма, где наиболее крупные трещинные зоны ориентированы на северо-восток, (рис. 4), большинство водотоков, следуя уклону земной поверхности, направлено на северо-запад.

Отличительной особенностью строения всех без исключения зон раздвижения является кулисовидность (рис. 1, 2, 4). Представляется, что есть два варианта объяснения их природы: сдвиговые смещения, сопутствующие раздвижению, и азимутальное несоответствие ориентировки первичной прочностной анизотропии породных массивов направлениям наложенных на них зон раздвижения. В последнем случае, очевидно, главное значение имеет ориентировка орогенного сжатия. Об этом свидетельствует наблюдаемая в детально изученных районах параллельность кулис разнонаправленных трещинных зон ориентировке ближайшего горноскладчатого сооружения. Так, в западной и центральной частях Крыма трещинные зоны, ориентированные на СВ (рис. 1, 4) или на СЗ (рис. 2, Г), т. е. диагонально к альпийскому мегантиклинорию, состоят из субширотных, т. е. приблизительно параллельных антиклинорию кулис. В Северо-Западном Причерноморье (рис. 2, А, Б) все трещинные зоны независимо от их направления состоят из кулис ССЗ—ЮЮВ-ориентировки, т. е. параллельных Восточным Карпатам.

Важнейшей чертой взаимоположения зон новейшего и современного раздвижения континентальной коры является наблюдаемая во многих

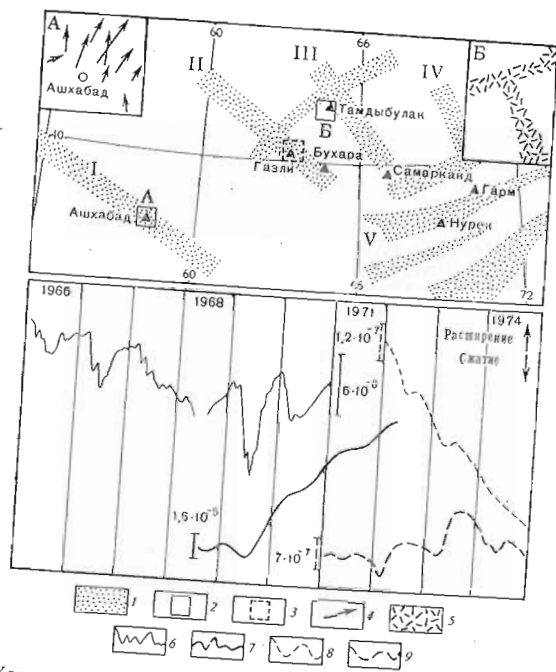


Рис. 6. Характер современного раздвижения земной коры западной части Средней Азии

1 — зоны концентрации эпицентров сильных землетрясений (I — Ашхабадско-Красноводская, II — Ургенч-Бухарская, III — Тамдыбулак-Самаркандская, IV — Ташкентская, V — Гиссаро-Кокшаальская), 2 — участки, показанные на врезках, 3 — участок, показанный на рис. 3, А, 4 — направление и относительная величина смещения геодезических пунктов (по Д. Н. Рустановичу), 5 — зоны современного тектонического трещинообразования (по Р. Н. Ибрамову и др.), 6 — характер горизонтальных деформаций пород в меридиональном направлении на станции Кондара (по Л. А. Латыниной и Р. М. Кармалеевой), 7 — то же, на станции Нурек, 8 — то же, на станции Чусал, 9 — то же, на станции Чиль-Дора

расширяющихся с востока на запад, в сторону уменьшения мощности земной коры от 50—55 (Северный Памир) до 35—43 км (Таджикская депрессия). По северной из этих зон, которая в тектонической литературе рассматривается обычно как Гиссаро-Кокшаальская зона разрывных нарушений, имеется деформационный материал (Латынина, Кармалеева, 1978), показывающий, что в настоящее время в ее северной части фиксируется субмеридиональное сжатие, интенсивность которого уменьшается с востока (Чусал, Гарм) на запад (Кондара), а южная часть испытывает субмеридиональное растяжение: очень слабое на востоке (Чиль-Дора) и весьма интенсивное на западе (Нурек). Таким образом, есть основания считать, что в настоящее время эта зона испытывает давление со стороны блоков земной коры, ограничивающих ее с севера, и веерообразно расширяется в южном направлении. То же, очевидно, относится и к другим трещинным зонам рассматриваемого веера, но деформационный материал по ним отсутствует.

Веер раздвижения земной коры, находящийся на севере западной части Средней Азии, характеризуется расхождением трещинных зон в северном направлении, в сторону регионального сокращения толщины земной коры от 50—60 км в пределах альпид Конетдага и Памира до 35—45 км в центральной части Туранской плиты. На западе трещин-

ные зоны ориентированы на ЗСЗ, восточнее их ориентировка постепенно меняется на СЗ, а затем на ССЗ. Наиболее крупными и сейсмически выраженными являются следующие: Ашхабад-Красноводская (ЗСЗ 305°), Ургенч-Бухарская (СЗ 310°), Тамдыбулак-Самаркандская (СЗ 330°), Ташкентская (ССЗ 340°) (рис. 6). Современная активность рассматриваемого веера трещинных зон подтверждается его сейсмичностью, современным тектоническим трещинообразованием, наиболее детально изученным в районе Тамдыбулака (Ибрагимов и др., 1973), и геодезическими данными. Последние показывают, что раскрытие веера происходит в основном на восток, по часовой стрелке: плановое смещение пунктов Ашхабадской базисной сети I класса за 1946—1959 гг., согласно Д. Н. Рустановичу (1967), составило 0,70—1,78 м (5—14 см/год) на ССВ (рис. 6); смещение геодезических пунктов в районе Газли за 1962—1976 гг., по материалам В. А. Пискуйца (1978), составляет 0,15—1,05 м (1—8 см/год) на СВ и ВСВ (рис. 2, А). О вращении по часовой стрелке земной коры в районе Самарканда свидетельствует известный факт изменения азимута секстанта в обсерватории Улугбека, произошедшего на 10' к востоку в течение 500 лет (Пинков, 1977).

Веерообразность раздвижения земной коры отчетливо проявляется в секторе, ограниченном с востока Курило-Камчатской дугой. Зоны раздвижения, выявленные нами по гамма-картографу скважин, по геоморфологическим, сейсмологическим и нефтегазорозведочным данным (Штенгелов, 1978), расположены здесь явно веерообразно, имея на севере (центральная часть Камчатки) субширотную, а на юге (Сахалин, Приморье) субмеридиональную ориентировку. Так же расположены дизъюнктивные дислокации верхней мантии, установленные с помощью геофизических методов (Беляевский и др., 1977), и большинство рифтовых зон дна Охотского моря (Гнибиденко, 1977), причем в строении двух наиболее крупных рифтовых зон отчетливо проявляется расширение на юго-восток, в сторону дуги.

Камчатский веер ограничен с востока хорошо выраженной дугообразной зоной вращательного сдвига. Ее характерными особенностями являются наличие глубоководного желоба и сейсмофокальной поверхности, наклоненной под углом около 45° под континент и имеющей форму сужающейся вниз конической поверхности. Эти особенности связаны, очевидно, с тем, что в дуге сочетаются вращательный сдвиг (в связи с продолжающимся раскрытием веера) и надвигание толстой и интенсивно раздвигающейся коры внутри веера на тонкую кору за его пределами. Реальность последнего подтверждается смятостью в складки четвертичных, в том числе голоценовых, донных осадков в Курило-Камчатской и всех других островных дугах (Ле Пишон и др., 1977), а также прямыми геодезическими данными о надвигании континентальной коры на океаническую, имеющимися по некоторым дугам, например по Алеутской и Японской (рис. 3, Г, Д).

Данный процесс наблюдается, видимо, в той или иной степени во внешнем контуре и других вееров. Так, в пределах дугообразной зоны, ограничивающей с юга Крымский веер (рис. 4), также установлена смятость четвертичных донных осадков (Ушаков и др., 1977), и наблюдается наклон сейсмофокальной плоскости в сторону континента (Шуркин, 1977). Однако угол этого наклона много меньше (около 10° от вертикали), т. е. надвигание континентальной коры на океаническую происходит менее интенсивно, чем на Камчатке. Глубинность землетрясений в пределах дуги Крымского веера также значительно меньше (40—50 км), что, очевидно, объясняется более низкой скоростью вращательного сдвига (на больших глубинах, в мантии, данная скорость сдвига успевает компенсироваться безразрывным вязкопластичным течением). Что касается гравитационного минимума, примающего со стороны



Крымского веера к ограничивающей его дуге (рис. 4) (такие минимумы еще более отчетливо обнаруживаются в пределах всех островных дуг), то он обусловлен, очевидно, максимальной тустотой и шириной зон трещинного разуплотнения на внешней периферии веера.

Такие гравитационные минимумы и отрицательные формы рельефа наблюдаются на внешних контурах всех вееров раздвижения земной коры.

### О ПРИЧИНАХ НОВЕЙШЕГО И СОВРЕМЕННОГО РАЗДВИЖЕНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ

В работе (Штенгелов, 1979<sub>2</sub>) приведены данные, показывающие, что современный этап раздвижения земной коры начался в среднем или верхнем плиоцене, т. е. после завершения наиболее активной фазы альпийского тектонического цикла. Несколько раньше (Штенгелов, 1978) показано, что раздвижение сжатой и деформированной орогенезом континентальной коры, сопровождавшееся формированием геосинклинальных трогов, авлакогенов, микрограбенов и трещинных зон, неоднократно повторялось в геологической истории Земли, следуя после завершения каждого горообразовательного цикла.

В связи с вышесказанным вопрос о движущих силах посторогенного раздвижения земной коры приобретает особый геотектонический интерес. Прямая связь между активностью раздвижения и величинами остаточных тектонических напряжений, направленность современных горизонтальных движений земной коры в стороны от горноскладчатых сооружений (рис. 3, Б, Г, Д, Е; 6) — эти факты свидетельствуют о том, что раздвижение в значительной степени обусловлено неоднородностью напряженно-деформированного состояния сжатой орогенезом коры. Чем больше внутренняя потенциальная энергия сжатых пород, мантийное вещество и особенно заключенных в них флюидов, тем неустойчивее система и тем легче различные внешние силовые воздействия приводят к ее трещинному разрушению. Среди этих внешних воздействий важнейшую роль играют, видимо, явления планетарного порядка: неравномерность вращения Земли, силы Кориолиса и т. д. Об этом свидетельствует повсеместное сходство ориентировки трещинных зон: явное преобладание СВ и СЗ азимутов при подчиненной роли субмеридиональных и субширотных.

Что касается вопроса о том, за счет какого пространства осуществляется раздвижение континентальной коры, то здесь прежде всего следует отметить, что увеличение площади интенсивно раздвигающихся участков коры сопровождается их надвижением на соседние участки. Этот процесс, как уже указывалось, наиболее интенсивно идет при формировании вееров раздвижения на материковых окраинах.

Следует указать, что посторогенное раздвижение континентальной коры, вполне возможно, инициируется и некоторым увеличением радиуса Земли, происходящим в межорогенные эпохи. Как известно, пульсационная геотектоническая гипотеза поддерживается в настоящее время Е. Е. Милановским, П. Н. Кропоткиным и многими другими отечественными и зарубежными тектонистами.

Приведенные данные показывают актуальность дальнейшего изучения современной геодинамической зональности в различных районах мира. Накопление нового материала позволит существенно уточнить и развить имеющие несомненный принципиальный интерес вопросы, затронутые в данной публикации.

### ЛИТЕРАТУРА

Адамия Ш. А. и др. Геолого-геофизические особенности строения земной коры и верхней мантии Черноморско-Кавказского сегмента Средиземноморского складчатого пояса. В сб. «Глубинное строение и геофизические особенности структур земной коры и верхней мантии». «Наука», М., 1977.

Апродова А. А. О трещиноватости четвертичных и коренных пород Подмосквья. В сб. «Новейшая тектоника, новейшие отложения и человек», № 2. Изд. МГУ, 1969.

Балевский Н. А. и др. Зона Заварицкого-Беньофа и сопровождающие ее разломы в северо-западной части Тихого океана. В сб. «Разломы земной коры». «Наука», М., 1977.

Буданов Н. Д. Роль новейшей тектоники и связанных с ней трещинных нарушений в гидрогеологии Урала. Сов. геология, № 58, 1957.

Буллин Н. К. Некоторые выводы из анализа измерений естественных напряжений в горных выработках. Сб. «Напряженное состояние земной коры». «Наука», М., 1973.

Геологические и геофизические данные о Большом Трещинном Толбачинском извержении. «Наука», М., 1978.

Гнибиденко Г. С. Рифтовая система дна Охотского моря. В сб. «Роль рифтогенеза в геологической истории Земли». «Наука», Новосибирск, 1977.

Горбунов Г. И., Макиевский С. И., Миркин Г. Р. Значение анализа трещиноватости для прогноза размещения полезных ископаемых. Сов. геология, № 5, 1977.

Данилов В. В. Методы обработки повторных геодезических измерений. Тр. Геофиз. ин-та АН СССР, № 5 (132), М., 1949.

Захаров В. К. Горизонтальные смещения земной поверхности в районе шахты Шенбунино (Сахалин) после Монеронского землетрясения 1971 г. Тр. Сахалинского компл. НИИ ДВНЦ АН СССР, вып. 30. Владивосток, 1973.

Ибрагимов Р. Н., Якубов Д. Х., Ахмеджанов М. А. Новейшие структуры Центральных Кызылжумуков и их сейсмотектонические особенности. «Фан», Ташкент, 1973.

Казанчян П. П. Из опыта исследований современных движений земной коры в Армении. В сб. «Проблемы современных движений земной коры». «Наука», М., 1969.

Комарова М. В., Штенгелов Е. С. Геоморфологическое выражение зональности современного тектонически-напряженного состояния земной коры. Геоморфология, № 4, 1977.

Латыгина Л. А., Кармалева Р. М. Деформационные измерения. «Наука», М., 1978.

Ле Пишон К., Францито Ж., Боннин Ж. Тектоника плит. «Мир», М., 1977.

Мельничук М. И. О некоторых особенностях проявления глубинных процессов в тектонике Закарпатского прогиба. «Геофиз. сб. АН УССР», вып. 66. «Наукова думка», Киев, 1975.

Мещеряков Ю. А. Изучение современных движений земной коры и проблема прогноза землетрясений. В сб. «Современные движения земной коры», вып. 3. М., 1968.

Миркин Г. Р. Структурно-тектонический анализ распределения густоты мегатрещин. Сов. геология, № 5, 1968.

Напряженное состояние земной коры. «Наука», М., 1973.

Никонов А. А. Голоценовые и современные движения земной коры. «Наука», М., 1977.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. «Наука», М., 1977.

Пискулин В. А. Геодезические данные о деформации земной поверхности в районе Газли. Геодезия и картография, № 3, 1978.

Пустовитенко Б. Г., Каменобродский А. Г. Некоторые закономерности миграции очагов землетрясений Крыма за последние сто лет. «Геоф. сб. АН УССР», вып. 65. «Наукова думка», Киев, 1975.

Пустовитенко Б. Г. Тектонические напряжения в земной коре Крымского рифтона по данным об очагах слабых землетрясений. «Геоф. сб. АН УССР», вып. 78. «Наукова думка», Киев, 1977.

Рустанович Д. Н. Сейсмичность территории Туркменской ССР и Ашхабадское землетрясение 1948 года. «Наука», М., 1967.

Ушаков С. А., Галушкин Ю. И., Иванов О. П. Природа складчатости осадков на дне Черного моря в зоне перехода к Крыму и Кавказу. Докл. АН СССР, т. 233, № 5, 1977.

Штенгелов Е. С. Геохимические особенности водопроницаемых трещинных зон в жестких осадочных породах. Геохимия, № 12, 1976.

Штенгелов Е. С. Зоны современного тектонического растяжения в Крыму и юго-западной части Русской плиты. Изв. АН СССР. Сер. геол., № 2, 1977.

Штенгелов Е. С. Посторогенное раздвижение континентальной коры в геологической истории Земли. Докл. АН СССР, т. 243, № 3, 1978.

Штенгелов Е. С. О природе Газлийских землетрясений. Докл. АН СССР, т. 245, № 1, 1979.

Штенгелов Е. С. Некоторые вопросы плиоцен-четвертичного раздвижения континентальной коры. Бюл. МОИП. Отд. геол., № 4, 1979.

Шукин Ю. К. Сейсмогенные структуры и фокальные зоны Альпийского пояса, их связь с геологическими полями и разломами. В сб. «Разломы земной коры». «Наука», М., 1977.

Lang A. Vorläufige ergebnisse einiger Geodatischer Untersuchungen über Horizontale Krustenbewegungen in der Elbtalzone. В сб. «Проблемы современных движений земной коры». «Наука», М., 1969.

Meade B. K. Horizontal crustal movements in the United States. Intern. Un. Geod. Geoph. General Assembly. Berkeley, 1963.