

На пути к прогнозу землетрясений

В. И. УДОМОВ,
*кандидат физико-математических наук,
заместитель директора Института сейсмологии
Академии наук УзССР*

Изучение причин землетрясений — основная задача сейсмологии. Эта задача непосредственным образом связана с важнейшей проблемой прогноза землетрясений.

Как известно, землетрясения вызываются резким сдвиговым перемещением горных пород в недрах земной коры или в более глубоких горизонтах земли. Резкое перемещение, в свою очередь, обусловлено предельно накопившимися упругими напряжениями, которые в конечном итоге разрушают твердую среду. Изучение характера накопления упругих сил и динамических особенностей деформируемой среды является одним из путей поиска возможных предвестников землетрясений.

Для простоты представим себе земную кору не каменной оболочкой, а в виде мощного слоя пористой резины, местами растрескавшейся до значительной глубины.

По каким-то причинам, связанным, например, с действием сложных физико-химических процессов во внутренних частях Земли, этот резиновый слой начинает сминаться в складки, деформироваться. Если процесс деформации протекает достаточно быстро, отдельные участки резины (вероятнее всего там, где уже есть трещины) рвутся и резко перемещаются относительно окружающей среды. При этом возникают толчки, которые на поверхности земли ощущаются как землетрясение.

Таким образом, землетрясению предшествует деформация среды, например, ее сжатие. Сжатие происходит не сразу, а длится некоторое время, достигая критической величины незадолго до начала землетрясения.

Итак, казалось бы, до прогноза один шаг! Нужно только измерить на большой глубине величину и определить характер роста сжимающих сил. Необходимо также заранее знать прочность материала среды, чтобы сказать, когда произойдет разрыв, объем среды, которому предстоит разорваться, и т. п. Но на самом деле все это чрезвычайно сложно. Правда, здесь могут прийти на помощь результаты лабораторных исследований деформаций и разрывов твердых тел. Оказывается, что прежде чем разорваться, материал, помещенный в условия, близкие к условиям в земной коре (высокое давление и температура и т. д.), тянется. Иными словами, разрыву предшествует пластическая деформация, во время которой практически не происходит изменения величины сжимаемого объема. Момент наступления пластической деформации можно заметить по некоторому кажущемуся прекращению действия сжимающих усилий. Но как следить за процессом роста упругих напряжений, если он происходит на глубинах, не доступных буровым скважинам? На помощь могут прийти сейсмические волны. Предположим, что мы решили наблюдать за «подготовкой» землетрясения в каком-нибудь небольшом районе, например, в Ташкенте. По одну сторону города установим чувствительную аппаратуру, а на противоположной стороне время от времени в одном и том же месте будем производить небольшие взрывы. Рассчитав определенным образом расстояние между

эпицентром взрыва и регистрирующей аппаратурой, можно «заставить» сейсмические волны, рожденные взрывом, пройти сквозь область подготовки будущего землетрясения. Если на пути волны ничего не меняется, то при строгом сохранении условий опыта от взрыва к взрыву, мы всякий раз будем получать совершенно похожие сейсмограммы. Допустим теперь, что где-то в очаговой зоне будущего землетрясения горные породы (в нашем случае — резина) начали сжиматься. Сразу на этом участке пути сейсмические волны изменят скорость распространения, и сейсмограммы тоже начнут изменяться. Наступление пластической деформации еще более исказит прежнюю форму сейсмограмм. Значит, надо ждать землетрясения!

Но все это просто в рассуждениях, на деле же гораздо сложнее из-за того, что трудно расшифровать сейсмограммы. И опять на помощь приходят сейсмические волны. На Центральной сейсмической станции «Ташкент» Института сейсмологии Академии наук УзССР создана аппаратура, которая позволяет в лабораторных условиях не только возбуждать миниатюрные сейсмические волны в небольших моделях земной коры, но и видеть их на светящемся голубом экране. И не только видеть, но и по желанию останавливать разбегающиеся круги волн, заставлять их двигаться с заранее заданной скоростью, возвращать их, если нужно, к источнику.

Принцип действия аппаратуры очень прост. В одном из участков тонкой пластины, изготовленной из эпоксидной смолы, непрерывно создается искровой разряд, который имитирует миниатюрные взрывы и рождает внутри модели сейсмические волны ультразвуковой частоты. Синхронно с разрядом вспыхивает импульсная лампа, свет от которой, преобразованный с помощью оптических устройств и поляридов, просвечивает модель упругой среды, где искусственно создается «очаг предстоящего землетрясения». Фронт ультразвуковой волны, распространяющейся внутри прозрачной пластины, деформирует упругую среду и может быть виден невооруженным глазом. Регулируя запаздывание световой вспышки от искрового разряда, можно управлять скоростью движения видимого фронта волны. Одновременно пьезоэлектрические сейсмоприемники и катодный осциллограф регистрируют сейсмограммы.

Занимательные на первый взгляд переливающиеся всеми цветами радуги «картинки» дают возможность как бы заглянуть в недра нашей планеты, обнаружить момент и характер приобретаемой на пути распространения волн информации. Открываются перспективы лучшего понимания сложных сейсмограмм, полученных миниатюрными сейсмоприемниками на поверхности этой же модели, возможности однозначно связывать характер записи с изменениями физико-механических свойств материала внутри среды.

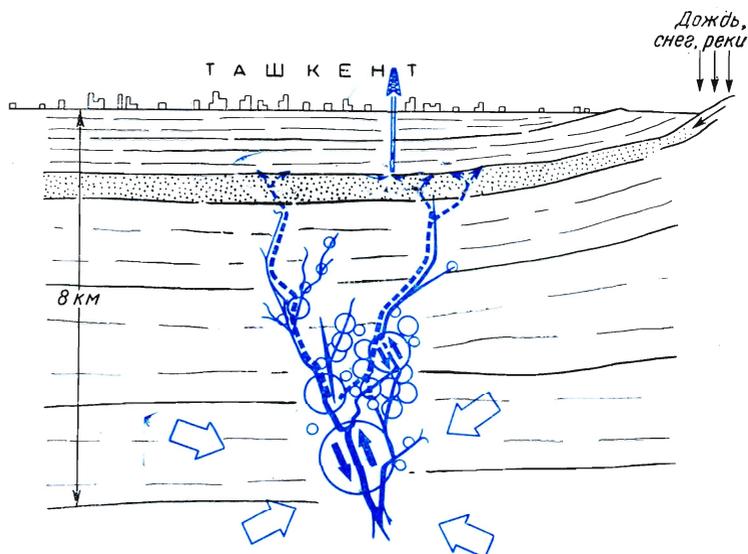
Есть и другие пути к прогнозу землетрясений. Допустим, что поры резиновой «земной коры» заполнены минерализованной водой, которая вследствие высоких давлений и температур медленно пробирается по тонким трещинкам к поверхности земли. Встречая на пути водоносные горизонты, минерализованная на больших глубинах вода относительно равномерно поступает в них, принося с собой определенную концентрацию микроэлементов. А теперь представим себе, что в некотором объеме земной коры началась интенсивная деформация, т. е. появилось воздействие, сжимающее нашу «резиновую губку». Сразу же поступление минерализованной воды из пор начнет усиливаться. Соответственно повысится и концентрация микроэлементов в вышележащих водоносных горизонтах. Поскольку до этих горизонтов пробурить скважину значительно легче, чем до очаговой зоны землетрясения, то достаточно откачивать воду и изучать ее химический состав. В Ташкенте минеральная вода сама изливается из скважин на поверхность.

Наиболее надежным индикатором «надавливания» на «резиновую губку» оказался растворенный в воде газ — радон. У радона есть замечательные свойства, которые дают возможность использовать его в научных исследованиях. Радон (как инертный газ) не вступает ни в какие химические реакции, т. е. не «отвлекается» по пути к поверхности земли. Радон — радиоактивный химический элемент, имеющий короткую «жизнь»: период его полураспада немного больше трех с половиной суток. Благодаря этим свойствам радон можно использовать как очень «гибкий инструмент» для наблюдения за меняющимися во времени процессами.

Уже более десяти лет Институт курортологии и физиотерапии имени Н. А. Семашко изучает целебные свойства Ташкентской ми-

Рис. 1. Инертный газ — радон на службе сейсмологии.

Непрерывная деформация земной коры в сейсмоактивных районах создает локальные очаги упругих напряжений (белые стрелки), которые подобно сжимающей и растягивающей пружинам преодолевают прочность сцепления горных пород и, резко перемещая их, вызывают землетрясения (двойные синие стрелки). Но прежде чем «порваться», горные породы, в свою очередь, начинают деформироваться, «выжимая» радоно-содержащую воду и вышележащий водоносный горизонт (пунктирные стрелки). Термоминеральная вода, поступающая из скважины, подвергается газохимическому анализу



неральной воды, применяющейся в лечебных целях, и содержание в ней радона. Ташкентское землетрясение помогло привлечь радон и на службу сейсмологии. В результате всесторонних поисков предвестников сильных повторных толчков Ташкентского землетрясения удалось выяснить, что начиная с 1957 г. содержание радона в термоминеральной воде стало заметно увеличиваться. К середине 1965 г. оно возросло почти вдвое. Затем этот процесс развивался еще быстрее, но в октябре 1965 г. наступила стабилизация, продолжавшаяся до 26 апреля 1966 г., когда в Ташкенте произошло 8-балльное землетрясение. Сразу же после землетрясения концентрация радона резко упала, что и привлекло наше внимание к этому интересному явлению.

Термоминеральные воды артезианского бассейна залегают в Ташкентском районе на глубине 1300—2400 м (рис. 1). Водный бассейн питается, в основном, за счет атмосферных осадков в предгорных частях Ташкентского района и частично за счет миграции более глубоких вод. Интенсивность поступления последних или изменение содержания в них радона определяют изменение количества инертного газа в термоминеральном бассейне. Система тектонических нарушений в кристаллическом фундаменте, относительно высокая температура воды (около 60° С) и слабая радиоактивность (менее 40 эман) позволяют думать, что радоновые воды встречаются в зонах тектонических разломов. Радон — инертный газ и попадание его в воду обусловлено дупфу-

зией из «капилляров» породы, эманированием. Как установлено, эманирование определяется, в основном, структурой породы, присутствием в ней ходов, по которым радон, выделившийся из радия, попадает в окружающую среду. Очевидно, интенсивному выделению радона способствует разрушение кристаллических решеток минералов и развитие в породе дополнительной сети «капилляров» (о возможности «капиллярного» обогащения химического и газового состава минеральных вод неоднократно писал академик В. И. Вернадский). Известно, что на некоторых этапах геологического развития изменение состава термоминеральных вод протекает очень замедленно, а в периоды интенсивных геологических процессов может быть весьма значительным. Все это подтверждает закономерность обнаруженных нами явлений.

На рис. 2, а представлена кривая содержания радона в термоминеральной воде Ташкентского бассейна за период 1956—1967 гг. Пробы воды брались в устье глубокой скважины. 26 апреля 1966 г., когда произошло землетрясение, оказалось, что скважина расположена в непосредственной близости от его плейстоценовой области, которая занимает площадь около 10 км² в центральной части города (рис. 3). «Вспарывание» по разлому, вызвавшему землетрясение, началось на 8-километровой глубине и распространилось к юго-востоку до глубин порядка 3—4 км. Сейсмологические и геодезические исследования позволяют представить механизм многочисленных по-

Л.баллы Э.эмань

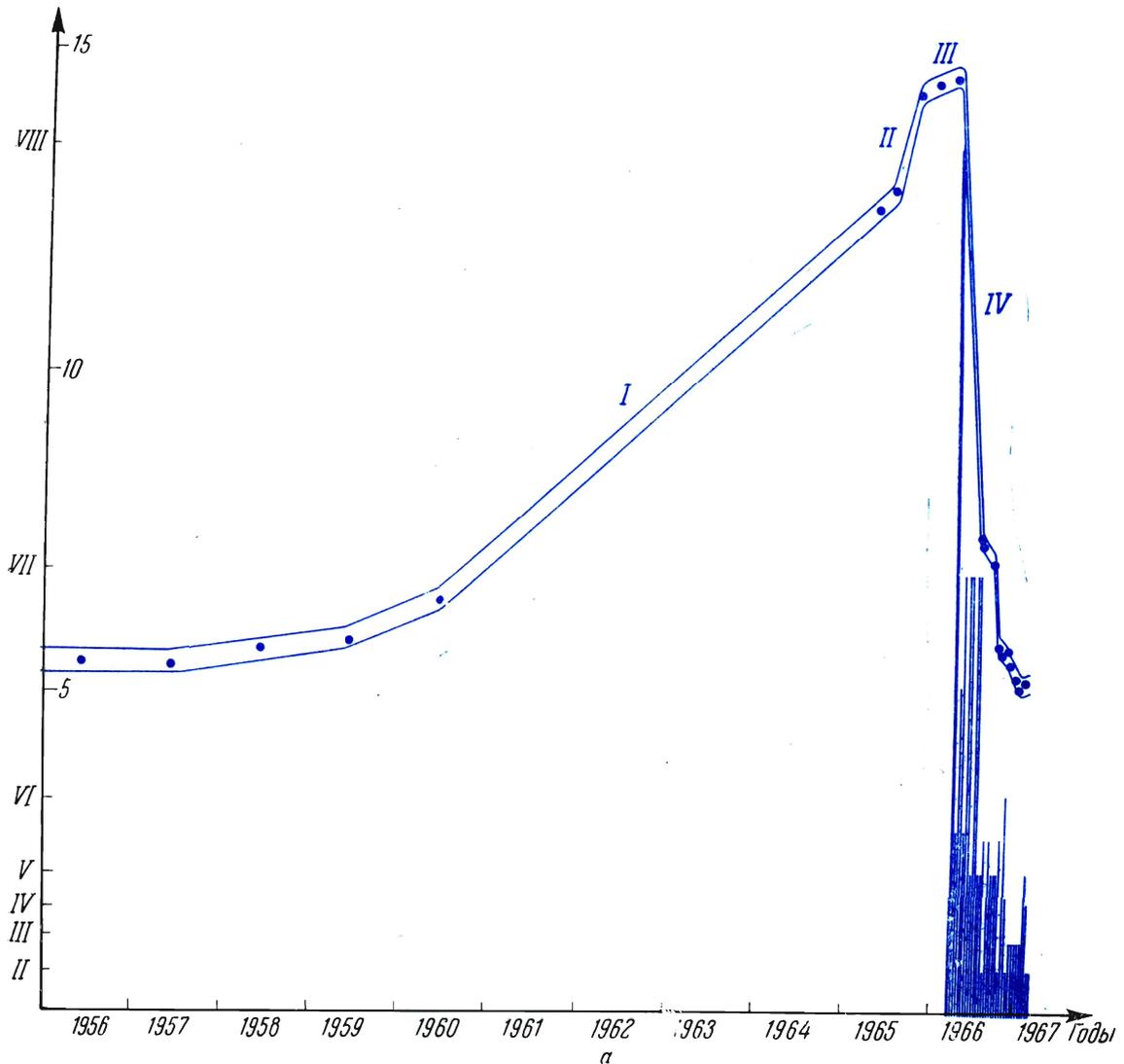
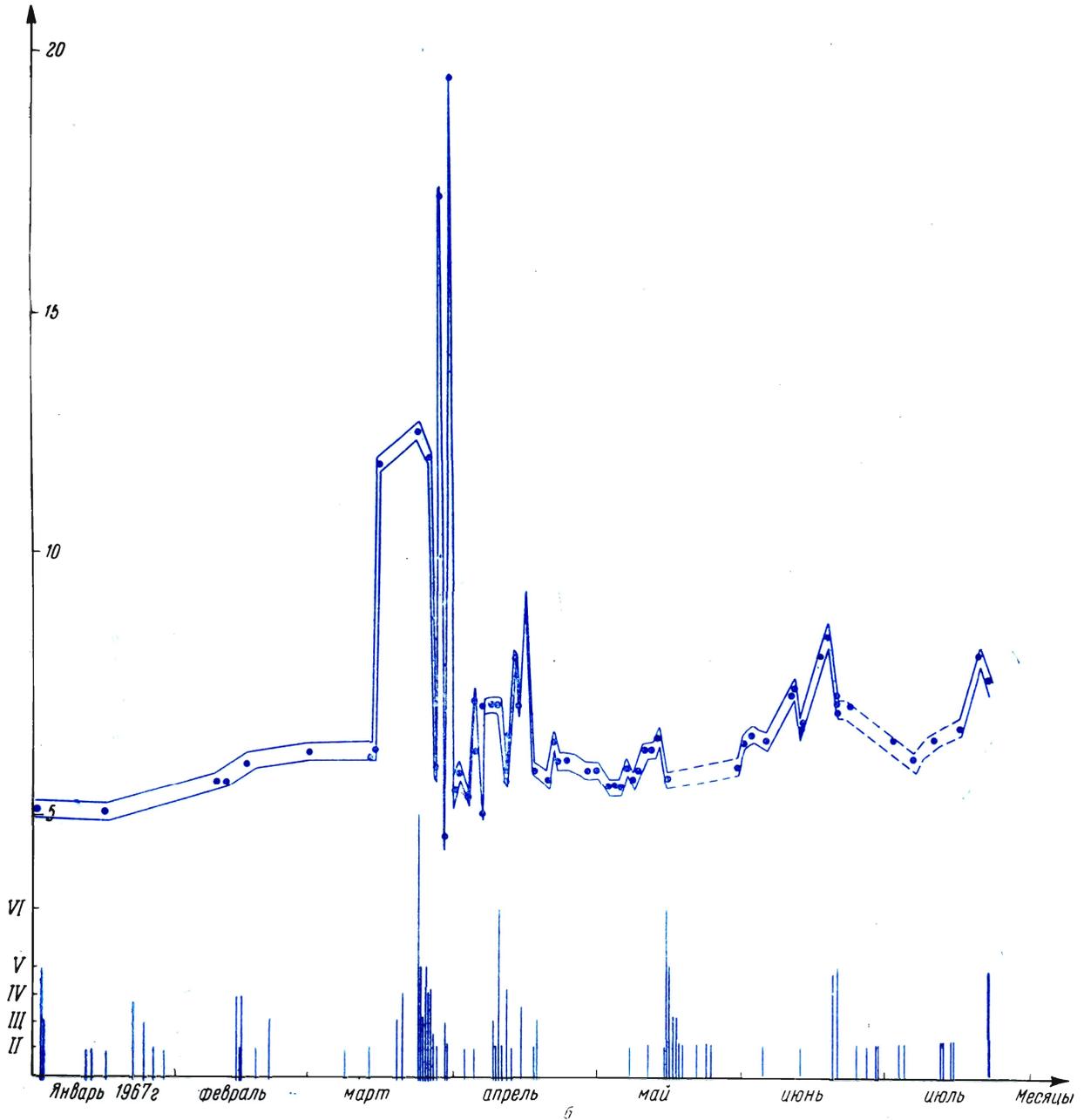


Рис. 2. Концентрация радона в термоминеральной воде Ташкентского минерального бассейна:

а — с 1957 по 1967 гг.; отметки на горизонтальной оси указывают годы, на вертикальной — интенсивность подземных толчков в баллах и концентрацию радона в эманах ($1 \text{ эман} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ кюри/литр}$). Синими точками обозначены данные замеров концентрации радона. Ширина осредняющей полоски соответствует величине ошибки отсчета. Римские цифры — этапы деформации горных пород, синие столбики — Ташкентское землетрясение и его афтершоки;

вторных толчков как результат упруго-пластического «рассасывания» — релаксации упругой энергии, возникшей в результате сдвигового перемещения пород в надочаговой зоне (рис. 4). Анализируя полученные результаты и следуя принципам механики де-

формируемых сред, мы можем (с достаточной степенью надежности и учетом реальных условий) рассматривать деформацию некоторого объема горных пород гипоцентральной области как последовательность четырех этапов (рис. 2, а):



б — о 7-балльном толчке 24 марта радон «информировал» за 10 дней до афтершока. Обозначения те же, что и на рис. 2, а, только на оси абсциссе из-за более частых замеров в 1967 г. указаны месяцы

I этап. Длительная медленно растущая упруго-пластическая деформация, сопровождающаяся уплотнением большого объема горных пород (закрытие пор, мелких трещин; деформация менее твердых включений и т. п.);

II этап. Относительно быстрая упругая деформация, также сопровождающаяся уменьшением объема горных масс и нарушением кристаллических решеток отдельных минералов;

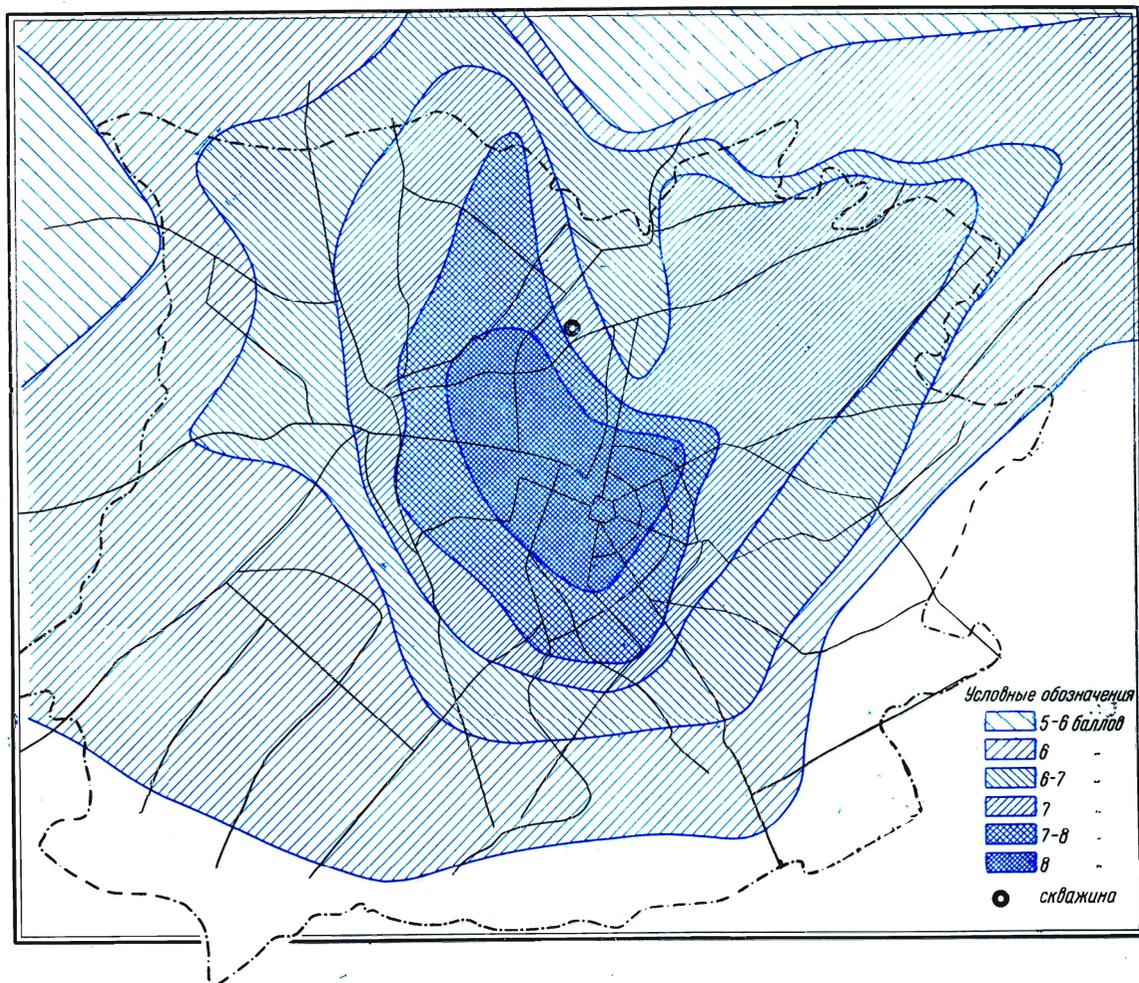


Рис. 3. Очаг землетрясения под центральной частью города.

Область 8-балльных изосейст охватила площадь около 10 км². Вытянутость изосейсты 8 баллов в юго-восточном направлении обусловлена простиранием разлома и перемещением горных пород в очаговой зоне. Изосейсты меньших баллов имеют ортогональную ориентацию и совпадают с простиранием погребенных структур кристаллического фундамента. Сложная конфигурация изосейст обусловлена влиянием грунтовых условий. Кружками показана скважина, вода из которой подвергалась анализу

III этап. Пластическая деформация, практически не сопровождающаяся уменьшением объема горных пород. Этот этап в условиях огромного всестороннего сжатия завершается резким сдвиговым перемещением горных масс — землетрясением;

IV этап. Релаксация упругих напряжений, возникших в результате перемещения масс. Процесс сопровождается серией упруго-пластических разрывных нарушений в надочаговой зоне (повторные толчки землетрясения) и завершается максимальным снятием упругих напряжений в зоне очага.

Изменение (увеличение) объема горных масс при этом протекает не монотонно, а определяется характером подвижек в период повторных толчков. Продолжительность этого этапа, по-видимому, близка к продолжительности двух предыдущих.

Таким образом, медленная упруго-пластическая деформация горных пород, вмещающих «капиллярные» воды, способствовала на протяжении нескольких лет «выжиманию» вод (а возможно, и усилению растворения в них радона) и транспортировке их внутрь водного бассейна (I этап). В середине

1965 г. процесс механического уплотнения горных масс достиг предела — началась их упругая деформация, вследствие которой в течение трех-четырех месяцев вода усиленно выжималась, обогащаясь радоном за счет нарушения кристаллических решеток минералов и двигаясь к поверхности земли (II этап). Затем поступление радона на некоторое время стабилизировалось: по-видимому, началась пластическая деформация (III этап), которая была прервана нарушением целостности пород в очаговой зоне, а следовательно, и значительным снятием накопившихся упругих напряжений — землетрясением.

Вышележащая толща, сдавленная во время перемещения блока горных пород в очаге землетрясения, подверглась интенсивной деформации. «Рассасывание» упругих напряжений, как уже отмечалось, началось сразу после землетрясения в виде постепенно убывающих по силе и количеству повторных толчков. Так происходила разгрузка очаговой области и восстанавливался прежний режим поступления глубинных вод, а следовательно, и радона (IV этап). Механизм «выжимания» радоносодержащей воды из очаговой зоны в артезианский бассейн схематично показан на рис. 1.

Отсутствие замеров концентрации радона в течение трех месяцев после главного землетрясения позволяет судить лишь в общем о спаде ее величины в период сильных повторных толчков и не дает возможности оценить колебания газового компонента. Однако в результате организации к концу 1966 г. более частых замеров удалось показать, что и незадолго до сильных повторных толчков (4—7 баллов) в ряде случаев также наблюдалось заметное увеличение концентрации радона в термоминеральной воде (рис. 2, б). Так, в ночь с 14 на 15 марта 1967 г. содержание радона резко повысилось с 6 до 12 *эман*, продержалось на этом уровне в течение недели, а 23 марта в Ташкенте произошло 6—7-балльное землетрясение! Затем концентрация радона начала резко варьировать в диапазоне от 4 до 20 *эман*, приближаясь к нормальному уровню. Сходная картина наблюдалась и во время более слабых афтершоков. Не исключено, что в случае повторных толчков механизм поступления радона несколько иной. Этим вопросом предстоит еще заниматься. Однако связь между изменением концентрации радона и

основным землетрясением не вызывает сомнений. Прогноз ли это? Возможно, что да. Исследования продолжаются. Продолжаются поиски предвестников стихийного бедствия. Изучаются необычные феномены, которые наблюдались в период и после Ташкентского землетрясения: интенсивное свечение приземного слоя атмосферы, похожее на рассеянный свет зарниц; электрический заряд на верхнем конце специальной антенны, погруженной в буровую скважину на глубину 500 м; голубые вспышки на сухих стенах домов; напоминающая разряд шаровой молнии ослепительная вспышка, которая произошла в эпицентре землетрясения за 1-2 секунды до подземного толчка; самопроизвольная вспышка люминесцентных ламп дневного света и т. д.

Сейчас у сейсмологов Узбекистана большие возможности для научных исследований. При Институте сейсмологии, созданном в 1966 г. Академией наук УзССР, открыта Ташкентская сейсмологическая обсерватория. Она располагает научно-исследовательским полигоном из десяти сейсмо-геофизических станций (см. 4-ю страницу обложки). Четыре станции уже действуют, остальные строятся. Все станции будут оборудованы разнообразной геофизической аппаратурой: сейсмометрической, геоакустической, наклономерной, электрометрической, магнитометрической и др.

Основная задача обсерватории — прецизионные наблюдения за проявлениями сейсмичности, изучение взаимосвязи сейсмического режима и вариаций геофизических полей.

Особое внимание уделяется изучению медленных деформаций земной поверхности с высокочувствительными наклономерами и периодически повторяющейся первоклассной нивелировкой. На территории центральной сейсмической станции «Ташкент» (ЦСС) устанавливается 30-метровая вышка, с которой специальными светодоляномерами будут регистрироваться медленные горизонтальные деформации земли. На территории эпицентральной станции (ЭСС), расположенной в районе наибольшего сгущения эпицентров повторных толчков, будет пробурена скважина глубиной в 5 км. Впоследствии в забое скважины, в центральной части очаговой зоны разместится миниатюрная геофизическая аппаратура, в том числе сверхчувствительные сейсмоприемники и геофоны.

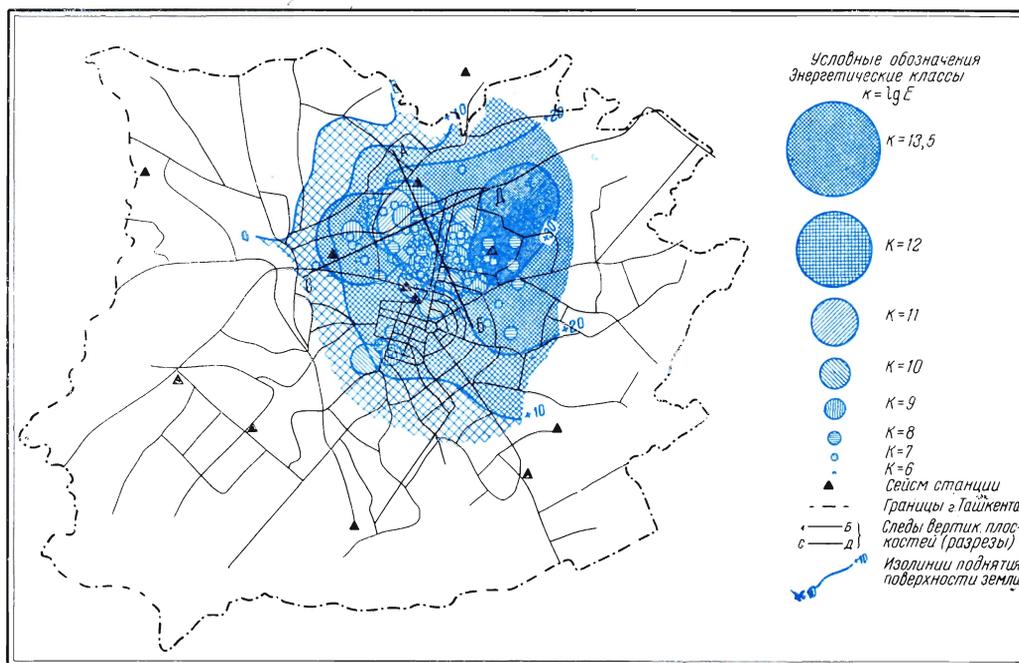


Рис. 4. Эпицентр основного толчка, определенный по сейсмограммам сети сейсмических станций Узбекистана, расположен в северо-восточной оконечности плейстосейстовой зоны.

Эпицентры почти всех афтершоков локализованы на правом приподнятом крыле разлома. По геодезическим данным поверхность земли над этим крылом претерпела в период повторных толчков медленное поднятие до 30—40 мм. Размеры кружков условно пропорциональны величине $K = \lg E$, где E — энергия сейсмических волн, выделившаяся в очаге

Молодой коллектив Института сейсмологии полон энтузиазма и уверенности в успешной разработке проблемы прогноза землетрясений. В организации научно-иссле-

довательских работ узбекским сейсмологам огромную помощь непрерывно оказывают Центральный Комитет Коммунистической партии Узбекистана и Правительство республики.



ДОННЫЙ СЕЙСМОГРАФ

Существует немало образцов донных измерительных систем, регистрирующих сейсмические эффекты на морских глубинах. Очень широко применяются и донные сейсмографы. Их используют при глубинном сейсмичес-

ком зондировании, для изучения шумовых условий на дне, особенностей очаговых зон землетрясений и подводных вулканов, а также для регистрации волн от удаленных землетрясений в условиях специфического строения океанической земной коры.

Вариант донного сейсмографа,

созданный на физическом факультете МГУ, отличается от других донных сейсмографов существенными особенностями:

1. Незначительный расход магнитной ленты позволяет довести длительность непрерывной работы прибора на дне до месяца и более;