## Искусственные землетрясения

Профессор Н. И. Николаев



Николай Иванович Пиколаев, доктор геолого-минералогических наук, заслуженный деятель науки РСФСР, заведует лабораторией неотектоники и сейсмотектоники Геологического факультета МГУ. Автор работ в области неотектоники, геоморфологии, четвертичной геологии и инженерной геологии. Лауреат Государственной премии СССР. Президент Международной комисии по неотектонике (INQUA), член рабочей группы ЮНЕСКО по вопросам связи землетрясений с крупными водохранилищами.

В последние годы все чаще наблюдается проявление локальной сейсмичности в районах, ранее считавшихся практически асейсмичными. В большой степени это относится к районам крупных водохранилищ. Высокая интенсивность некоторых возникших таким образом землетрясений приводит иногда к значительным разрушениям, повреждениям плотин и даже человеческим жертвам.

Как только этот факт был установлен, возникло сразу много вопросов: действительно ли землетрясения. возникающие при заполнении водохранилищ и поэже, связаны с инженерной деятельностью человека, или это случайное совпадение, особенно в областях сейсмических? Если человек способен возбуждать сейсмическую активность, то какова возможная степень опасности, каков порядок этого явления и нужно ли его учитывать при проектировании гидротехнических сооружений? Каков механизм подобных землетрясений, как исследовать эти явления и возможно ли их прогнозировать и регулировать?

При ЮНЕСКО была организована специальная рабочая группа экспертов из представителей международных ассоциаций, обществ и союзов. На двух заседаниях - в -1970 и 1971 гг. в Париже — была рассмотрена исчерпывающая информация обо всех зарегистрированных (около 30) землетрясениях, связанных с заполнением водохранилищ, а также о нескольких случаях увеличения сейсмической активности при инъекции жидкости в глубокие скважины. Анализ этих материалов сейсмологами, геологами, инженерами-геологами, инженерами по основаниям и

фундаментам и по механике грунтов, инженерами-сейсмологами и другими специалистами позволил сделать общий вывод: от возбужденных землетрясений не гарантировано ни одно из гидротехнических сооружений, и мы должны научиться предсказывать и регулировать их проявление.

В нашей стране зарегистрировано усиление сейсмической активности после заполнения I очереди Нурекского водохранилища на р. Вахше. Введение в эксплуатацию в ближайшие годы многих других крупных гидротехнических сооружений и дальнейшее развитие гидротехнического строительства требует привлечь внимание к этой актуальной проблеме и учесть существующий опыт зарубежных ученых.

#### Напряжения в земной коре

Землетрясения — следствие тектонических деформаций земной коры. Необходимое условие возникновения сейсмических толчков — накопление напряжений, вызываемое деформациями до уровня, при котором они превосходят временную прочность данной среды. На определенных участках вызываемые деформациями напряжения и прочность среды могут быть близкими по величине. Тогда. казалось бы, незначительные внешние факторы могут привести к разрядке напряжений с образованием разрывов в земной коре и землетрясению. Эти факторы могут быть как природными (внезапные изменения атмосферного давления, увеличение давления при океанических приливах,

изменения уровня грунтовых вод и др.), так и связанными с технической деятельностью человека (добыча нефти, подземные разработки, крупных водохранилищ, создание атомные взрывы). Действие их сводится к изменению напряжений в земной коре, которые могут достигнуть критической величины. А это приведет к образованию разрыва. Отсюда возникает необходимость оценки величины тектонических напряжений в массивах горных пород.

Абсолютная величина максимальных касательных напряжений, действующих в земной коре, представляет большой теоретический и практический интерес, но устанавливается, к сожалению, пока с малой точностью. Более точно определяется ориентировка действующих нормальных напряжений. Для выяснения напряженного состояния земной коры используют различные методы и данные: измерение деформаций в горных выработках, микроструктурный анализ, данные оптического моделирования, анализ градиента скорости тектонических движений и др. Однако в практике чаще всего ориентировка напряжений определяется методом анализа трещиноватости горных пород и механизма очагов землетрясений.

Образование разрывов сколового типа, с которыми и связываются обычно землетрясения, возможно в случае, если касательные напряжения в данном объеме горных пород достигают предела длительной прочности на скалывание. Угол скалывания а зависит от величины действия напряжений на сколовую прочность для каждого типа пород. Он близок ориентировке максимальных касательных напряжений (рис. 1). Наиболее наглядно ориентировка главных напряжений изображается на круговых диастереографической граммах проекции (рис. 2). В условиях неоднородностей и анизотропной среды эти закономерности могут нарушаться, и требуется специальный анализ полученных данных.

Используя эти методы (см. рис. 1 и 2), можно восстановить ориентировку главных нормальных напряжений, т. е. восстановить поле тектонических напряжений, действующее в различных горизонтах земной коры и верхней

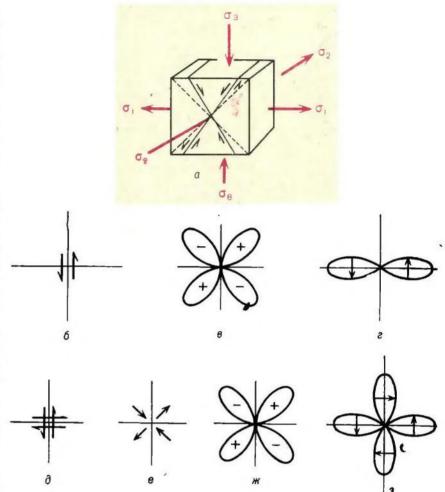


Рис. 1. Определение максимальных касательных напряжений по аналиви трещиноватости горных пород (а) и по анализу механизма очагов землетрясений (6 — г). В условиях изотронной среды ориентировка сопряженных сколов почти совпадает с площадками действия (пунктирные линии) жаксимальных касательных напряжений (б1, б2), образуя с ними угол а, величина которого зависит от свойств горных пород. Линия пересечения этих площадок определяет ориентировку оси промежуточного из главных новмальных напряжений од. Две другие оси (од, од) располагаются в плоскости перпендикулярной оси оз и совпадут с биссектрисами углов между трещинами, Анализ механизма очагов землетрясений основывается на рассмотрении характера направленности излучения продольных, поперечных и поверхностных волн, сопровождающих землетрясение. Наибольшим распространением пользуются две модели очага (6 — г и д — з). Пряжые линии, разделяющие области с разным знаком смещений, разделяют зоны сжатия (--) и растяжения (+). Одна из этих плоскостей отождествляется с плоскостью разрыва, возникшего в очаге. Первая модель (6 — г) основана на предположении действия в очаге пары сил (диполь с моментом), соответствующих излучению продольных и поперечных сейсмических волн. Более часто волновая картина соответствует второй модели  $(\partial - 3)$  с двумя парами сил (двумя перпендикулярными диполями) в источнике колебаний. Характер распределения сейсмических волн показан на рис. ж. и з.

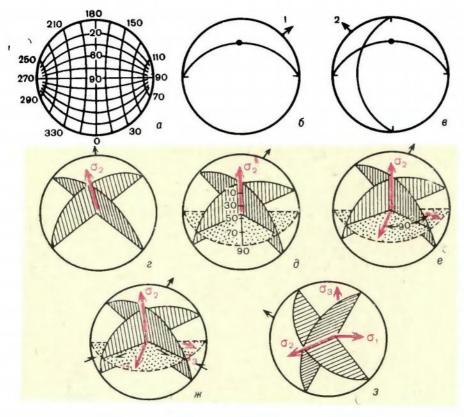


Рис. 2. Схема определения ориентировки осей напряжений при помощи стереографической сетки (а) по двум сопряженным системам трещин скалывания (по М. В. Гзовскому). Последующие рисунки (6 — 3) показывают графический способ восстановления полн напряжений. Сначала наносится положение двух систем трещин: с падением 45° по азимуту 135° (показана черной стрелкой 1) — 6; с падением 60° по азимуту 220° (показана стрелкой 2) — в. Пересечение плоскостей указанных сопряженных трещин (замтрихованы) определяет положение оси  $\sigma_2$  — г. Затем строится плоскость (показана точками), перпендикулярная оси (д), и находится биссектриса углов между двумя плоскостями трещин скалывания (е). По направлению смещения (красные стрелки) и величинам углов определяются оси растяжения  $\sigma_3$  (ж). Далее определяется угол и направление наклона оси  $\sigma_3$  (д), который в данном случае равен углу 10° по азимуту 260° (черная стрелка).

мантии и, таким образом, подойти к решению вопроса о механизме деформации.

В лаборатории неотектоники и сейсмотектоники МГУ были восстановлены поля тектонических напряжений для различных районов (рис. 3). Поле напряжений в верхних горизонтах земной коры оказалось весьма неоднородным и достаточно сложным. Могут быть выделены три основных компонента, определяющих естественное напряжение: 1) гравита-

ционные напряжения, обусловленные ныне действующей нагрузкой толщи лежащих выше пород; 2) латентные (скрытые) — обусловленные внутренними энергетическими ресурсами, связанные с веществом горных пород, их физико-химическими преобразованиями, которые вызываются эндолитогенными (внутрипородными) процессами; 3) тектонические напряжения, обусловленные проявлением современных и новейших тектонических деформаций коры. Этот компо-

нент представляет наибольший интерес.

Поле напряжений определяет тип разрывных деформаций, которые могут возникнуть в земной коре (см. рис. 3). Анализ новейших крупных разрывов Кавказа показал, что характер их соответствует современному полю напряжений. Следовательно, в момент их формирования и развития действовало то же поле напряжений, что и в настоящее время. Отсюда можно сделать вывод, что современное поле напряжений в значительной мере унаследует напряжения, возникшие в неотектонический этап. Одновременно можно наметить участки современной перестройки поля. Наибольшей сейсмической активностью характеризуются зоны сочленения разных полей напряжения (границы блоков) и отмеченные выше участки наиболее резкой перестройки поля. Следовательно, появляется принципиальная возможность использования поля напряжения при сейсморайонировании и прогнозе землетрясений.

Что же можно сказать о дополнительной нагрузке воды крупных водохранилищ? Как вода проникает по трещинам и порам в условиях «живой» тектоники, где величина естественных напряжений близка прочности среды? Почему водохранилище «генерирует» землетрясения? Не работает ли в данном случае водохранилище как «спусковой» механизм?

Мы попытались на составленную в лаборатории неотектоники и сейсмотектоники МГУ под руководством автора карту новейшей тектоники Мира (упрощенную) нанести местоположение водохранилищ (рис. 4), для которых были зарегистрированы возбужденные землетрясения, связанные с технической деятельностью человека. Можно видеть, что эти явления зафиксированы почти на каждом континенте. Интересно и то, что проявления возбужденных землетрясений тяготеют к областям активных новейших тектонических движений.

«Избыточные» напряжения в массивах горных пород, превышающие геостатическое давление, распределяются в толще земной коры неравномерно. Поверхность, ниже которой эти напряжения охватывают всю земную кору, лежит на разной глубине (до 1-2 км). Геолог П. Н. Кропоткин в 1971 г. путем экстраполяции определил глубину, где «избыточные» напряжения достигают максимальных величин. Она намечается в интервале 10-40 км. Вероятная величина напрясоставляет 2000 жений здесь  $5000 \text{ кг/см}^2$ , хотя эти цифры, как и сама модель, построенная П. Н. Кропоткиным, не могут считаться точными. Величина касательных напряжений в горных породах, слагающих верхние горизонты земной коры, значительно меньше - первые сотни до 1000 кг/см² (по М. В. Гзовскому, Н. Хасту и др.). Вычисление величины касательных напряжений по энергии сейсмических волн, основанное на представлениях о полном снятии напряжений в очаге, дает значение 200-800 кг/см $^2$  (по В. А. Магницкому), Однако существует мнение, что при землетрясениях напряжения снимаются только частично, а значит, полученные этим методом цифры несколько занижены.

Теперь посмотрим на примере Памиро-Гиндукушских землетрясений (рис. 5), какие поля тектонических напряжений можно выделить для различных горизонтов земной коры и верхней мантии. Ориентировка осей напряжений определяется типом деформации и косвенно зависит от физических свойств вещества. Мы сопоставили морфологию очаговой зоны схеме плотности гипоцентров землетрясений) с характером действующих напряжений. Оказалось, что они очень похожи на распределение напряжений и зон максимальных деформаций в участках нагнетания. При этом области выжимания пластического материала верхней мантии должны располагаться в пределах областей поднятий Гиссарского хребта и Южного Памира — Западных Гималаев и связаны с вертикальными перемещениями материала в более глубоких зонах мантии.

Для верхней части осадочного слоя характерно сложное дифференцированное поле тектонических напряжений. Субгоризонтальное положение — оси сжатия и субвертикальное — оси растяжения — преобладает в пределах антиклинальных структур (Таджикская впадина). Обратное соотношение осей наблюдается в пределах зон интенсивного прогибания. Анализ осадочного слоя земной коры как единого целого показывает, что ведущей «генеральной» ориентировкой оси сжатия, несмотря на указанные отклонения, является субвертикальная при субгоризонтальном растяжении. Для метаморфического и гранитного слоя коры наблюдается единая ориентировка осей главных нормальных напряжений вне зависимости от структур. При этом наблюдается субгоризонтальная ориентировка оси сжатия ( $\sigma_3$ ) и субвертикальная — оси растяжения  $(\sigma_i)$ .

В пределах базальтового слоя положение осей напряжений близко их «генеральной» ориентировке в верхнем осадочном слое земной коры, но выражено более четко. Таким образом, в пределах земной коры и верхней мантии рассматриваемого района может быть выделен ряд структурнодеформационных этажей. Они характеризуются различным типом деформаций и различным полем напряжений с ведущей ролью то горизонтально, то вертикально ориентированного активного сжатия. При этом вертикальные перемещения блоков вызывают горизонтальное перераспределение материала, которое на более высоких горизонтах, в свою вызывает вертикальные очередь, подвижки.

Первопричиной описанных явлений надо считать радиальное перемещение вещества в глубоких слоях мантии. Следовательно, можно предположить, что явление возбужденной сейсмичности может возникнуть в различных геодинамических условиях (разного поля напряжений и разного механизма деформации коры), что не может не сказаться на характере этого процесса. Для понимания возбужденных землетрясений необходимо дальнейшее изучение распределения напряжений в земной коре и верхней мантии.

Итак, в земной коре повсеместно проявляются «избыточные» напряжения, особенно в районах неотектонически подвижных, где напряженное состояние массивов горных пород обусловлено тектоническими причинами. Вместе с тем выясняется, что при благоприятных геолого-геомор-

фологических условиях эти напряжения могут разряжаться землетрясениями, спровоцированными естественными факторами.

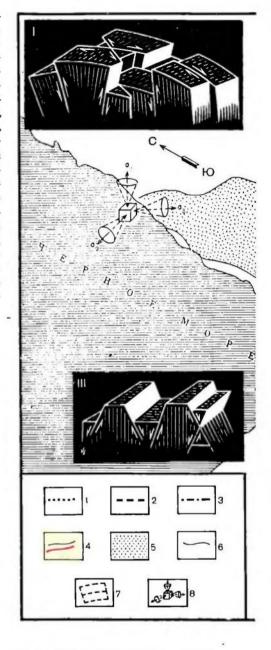
Оказывается, большие океанские приливы могут рассматриваться как спусковой механизм накопленной упругой энергии. Таким образом был объяснен механизм разрушительного Аляскинского землетрясения 1964 г. (Э. Берг. 1965) и связанные с ним афтершоки. Так же объясняют японские исследователи землетрясения в бухте Сагами, В ряде районов было установлено, что частота землетрясений увеличивается с увеличением водной массы во время паводков. Так объясземлетрясения в долине р. Миссисипи (Л. Макгиннис, 1965), а в Индии — в районе Чатры (С. К. Гуха и др., 1956). По-видимому, естественная «пригрузка» может вызвать частичную разрядку напряжений с выделением сейсмической энергии (рис. 6). Можно думать, что искусственная водная «пригрузка» в создаваемых крупных водохранилищах при благоприятных тектонофизических условиях (геологического строения м напряженного состояния земной коры) также может явиться «спусковым» механизмом ранеее накопленной упругой энергии.

# Эмпирические обобщения

Наблюдения над сейсмичностью, вызванной инженерной деятельностью человека в разных странах, позволили сделать некоторые эмпирические обобщения. Впервые такую задачу разрешили в 1968 г. американский геолог Д. Кардер и французский сейсмолог Ж. Ротэ. Мы уточияем их данные по новейшим исследованиям,

Количество толчков, вызываемых заполнением водохранилищ, очень велико и определяется сотнями и тысячами. Например, в течение 10 лет после постройки плотины Гувер и за-Мид водохранилища полнения (США), на площади 8 тыс. км² было зарегистрировано около 6 THIC. локальных толчков (рис. 7). В районе водохранилища Куробэ (Япония) за 7 лет после начала заполнения было отмечено 1182 землетрясения. А в

Рис. 3. Тектонические поля напряжений Кавказа и типы разрывных нарушений (по П. Н. Николаеву). 1-ось растяжения  $\sigma_1$ ; 2-промежуточнаяось ба; 3 — ось сжатия ба; 4 — граница между различными полями напряжений; 5 — антиклинальные зоны; 6 — граница антиклинальных зон; 7 предполагаемая линия перегиба ложа Каспийской впадины: 8 — ориентировка осей напряжения. Сочетания типов разрывных нарушений: 1-3aпадный Кавказ. Восточный Кавказ. Н — Центральный Кавказ. 111 — Куринская и Рионская впадины, IV - Верхнекуринская впадина, <math>V - Каспий,VI — зона перегиба. Из анализа карты следует, что Большой Кавказ, Аджаро-Триалетская зона и большая часть Малого Кавказа испытывают субжеридиональное сжатие, но во впадинах ведущей является вертикальная ориентировка оси оз, что указывает на вертикальные движения. Самхето-Карабахская зона Малого Кавказа по современному полю напряжения соответствует Куринской впадине. На последних этапах развития она испытывает прогибание, что подтверждает ранее высказанное аналогичное предположение В. Е. Хаина. Таким образом, в пределах Кавказа устанавливаются два механияма деформаций земной коры: первый — разуплотнение пород, сопровождающееся ивеличением объема и проявлением сжатия, что соответствует антиклинальным зонам; второй — уплотнение, вызывающее блоковые вертикальные движения, которые преобладают во впадинах. Современному полю напряжения в разных частях Кавказа соответствуют определенные сочетания разрывных нарушений.



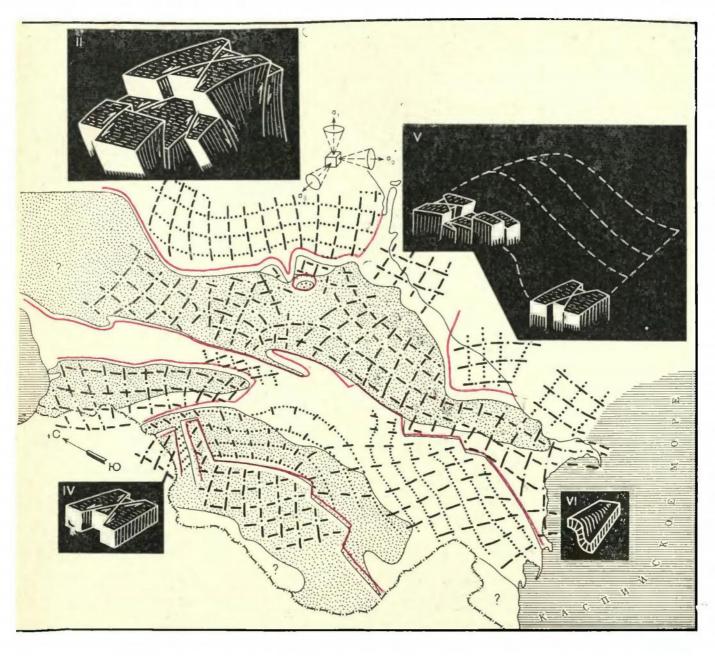
районе плотины Монтаньяр (Франция) после заполнения ежегодно регистрировалось 10—15 (до 23) толчков.

Локальные землетрясения, возникающие при заполнении водохранилищ, отличаются незначительной магнитудой (М) — менее 2—2,5. Реже проявляются толчки с M=3,5-5 и совсем редко с M=6-6,5. Только в трех случаях землетрясения имели разрушительные последствия (в райомах Кремаста в Греции, Койны в Индии и Карибы на р. Замбези в Африке).

В большинстве случаев это поверхностные землетрясения с очагами на глубинах менее 6 км. Но иногда отмечается и более глубокое положение гипоцентра (10 км). С этим связан обычно небольшой диаметр зоны сотрясаемости и ее малая площадь (1000 км²) (рис. 8). Большинство эпицентров группируется в зоды, которые контролируются структурными особенностями: распределением раз-

ломов, зон трещиноватости, простиранием структурных форм и др. Поэтому эпицентры землетрясений, связанные с возбужденной сейсмичностью, отмечаются не только в районах плотины и водохранилища, но и в удалении от них на несколько километров (рис. 9).

Обычно при заполнении водохранилищ наблюдается постепенное нарастание сейсмической активности, которая увеличивается к моменту первого заполнения водохранилища пос-



ле достижения максимального уровня. Как правило, она начинает проявляться спустя полгода - год с момента начала заполнения водохранилища (реже — более года), а потом затухает в течение нескольких лет. Частота толчков постепенно увеличивается на протяжении более или менее длительного времени - от полугода до 6 лет, причем этот период, конечно, более продолжителен в тектонически спокойных районах.

Для некоторых водохранилищ (Бе-

леча, Югославия) установлено, что подъем уровня воды сопровождается усилением сейсмической деятельности; стабилизация уровня ведет к ее ослаблению; после понижения уровня водохранилища сейсмичность резко ослабляется.

Как было установлено ранее, возбужденная сейсмическая активность особенно проявляется отчетливо, когда глубина водохранилища превышает 100 м. Теперь выясняется, что во многих случаях толчки возникают

и при достижении более низких уровней напора: Белеча (Югославия) — 40 м; Марафон (Греция) — 44 м; -Грандвиль (Франция) — 78 м; Уэт-Федда (Алжир) — 80 м и др. Однако толчки с относительно большим значением магнитуды (5-6,4) происходят в крупных водохранилищах с плотинами высотой около 90 м и более. В условиях меньших водохранилищ интенсивность землетрясений оказывается также меньшей. Однако, повидимому, играет роль не только вы-

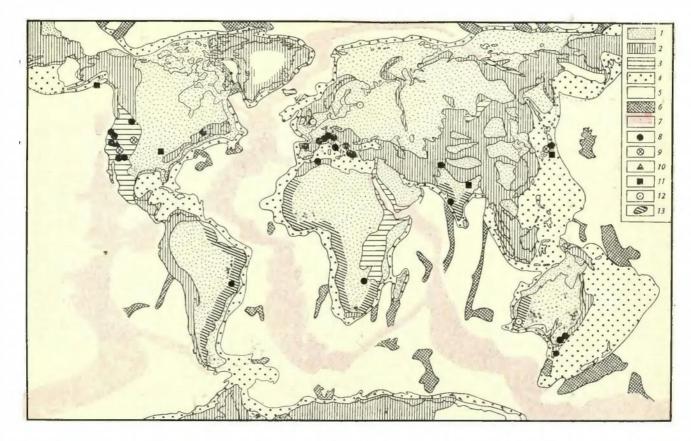


Рис. 4. Схема неотектоники и сейсмических явлений, связан ных с технической деятельностью человека. Геоструктуры материковые: 1— платформы, 2— орогены, 3— рифто гены; переходные: 4— зоны геосинклиналей, краевых разломов и континентальных флексур; океанические: 5— платформы, 6— орогены, 7— рифтогены. Остальные зники: 8— водохранилища, где обнаружена сейсмическая активность, 9— сейсмические явления, связанные с инъскцией жидкости в скважины, 10— сейсмические явления, связанные с атомными взрывами, 11— районы с выделением сейсмической энергии под влиянием периодической естественной нагрузки водных масс (паводки рек, приливы), 12— колебания подземных вод, связанные с атомны ми взрывами и землетрясениями, 13— районы возможного проявления возбуждений сейсмичности.

сота напора и ее колебания, но и площадь водохранилища. Поскольку в крупных водохранилищах увеличивается объем породы, подвергающейся воздействию воды, увеличивается и вероятность толчков.

И еще один важный вывод: возбужденные землетрясения проявляются в районах только определенного геологического строения — там, где развиты различного происхождения (гетерогенные) трещиноватые породы и блоковая тектоника. Необходимое условие для всех землетрясений, связанных с водохранилищем, — это ранее существовавшие разломы. Там, где их нет, нет и возбужденных землетрясений.

Значительно более сложно выявить,

каково влияние водохранилищ на ресейсмичность. гиональную свидетельствуют, что создание водохранилищ как бы усиливает общую сейсмичность района, выявляясь в широком радиусе от самого водохранилища. Примером может служить плотина Мангла (Пакистан). За 14 месяцев до заполнения водохранилища здесь отмечалось в среднем 1,6 землетрясений в месяц. После заполнения среднее количество землетрясений увеличилось до 4,1 в месяц. Соответственно увеличилось и среднемесячное освобождение сейсмической энергии от 3,0 · 1015 до 5,6 · · 1015 эрг. Такая же картина отмечается для водохранилища Куробэ (Япония).

## Механизмы возбужденных землетрясений

Каков же механизм возбужденных землетрясений?

Первое, на что было обращено внимание, это корреляция между землетрясениями и нагрузкой водохранилищ. Еще в 1945 г. Д. Кардер пришел к выводу, что землетрясения оз. Мид вызываются весом воды, влияющим на движение подстилающих блоков земной коры, которые перемещаются по неактивным разломам. Теоретическими расчетами, произведенными для оз. Кариба, так же как и для оз. Мид, было показано, что статическое давление веса воды

вызывает упругое прогибание (рис. 10). Максимально, как показал единственный в мире расчет, сделанный американскими исследователями Г. и В. Гафами в 1970 г., оно достигает 23,5 см, что подтвердилось и повторными нивелировками. Следовательно. гравитационная энергия, накопленная при опускании коры под весом воды, достаточна, чтобы вызвать основную сейсмическую активность в районе. При этом возрастают касательные и нормальное напряжения.

Такое объяснение совсем не обязательно предполагает накопление естественной тектонической энергии по локальным разломам. Гафы, так же как и Кардер, считают, что вес воды повлиял на движения блоков по разломам и что было достаточно смещения их на несколько дюймов, чтобы вызвать землетрясения. Однако данный механизм не может быть универсальным, так как не объясняет возбужденных землетрясений в случаях, когда нагрузка воды оказывается недостаточной.

Ряд авторов используют для объяснения возбужденных землетрясений гипотезу увеличения порового давления. Впервые это предположение высказал в 1966 г. Д. Эванс, чтобы объяснить землетрясения, возникшие в районе Денвера (штат Колорадо, США) (рис. 11) в результате закачки жидкости в скважину глубиной в 3,7 км (она углубилась в сильно трещиноватые гранито-гнейсы докембрия). Территория, ранее считавшаяся почти асейсмичной, стала сейсмически активной. За три года наблюдений произошло более 710 толчков. Была установлена полная корреляция объема инъецированной жидкости с частотой землетрясений. При этом сейсмическая активность проявлялась вдоль плоскости, которая проходит под скважиной на глубине 6,5 миль. Увеличение порового давления приводит к снижению прочности пород настолько, что оказывается возможным даже образование разрыва, сопровождающегося землетрясением. Поровое давление нейтрализует геостатическую нагрузку, уменьшает трение и приводит к смещению блоков по ранее образованным разрывам с освобождением тектонических на-

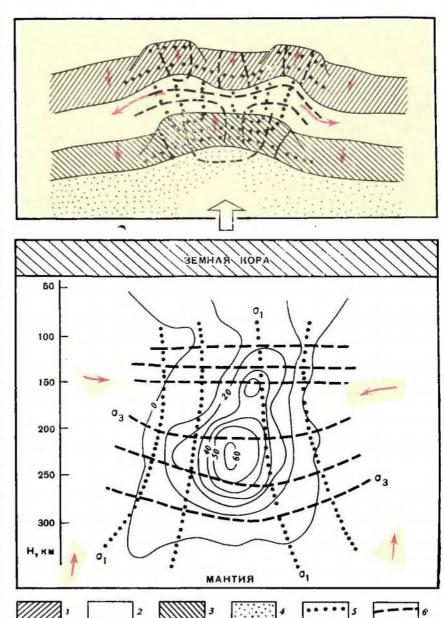


Рис. 5. Распределение осей главных нормальных напряжений в воне Памиро-Гиндукушских землетрясений (по  $\Pi$ . Н. Николаеву): для верхней мантии — внизу, для земной коры — вверху (масштаб произвольный). 1 — осадочный слой (0-10 км) характеризуется сложным дифференцированным полем тектонических напряжений, связанным со структурными формами; 2 — метаморфический и гранитный слой (10—25 км) представляет волновод (по И. Л. Персесову и Л. С. Чепкунас) и отличается единой ориентировкой осей главных нормальных напряжений: субгоризонтальной для оси сжатия  $(\sigma_3)$  и субвертикальной для оси растяжения  $(\sigma_1)$ ; 3- базальтовый слой (25-45 км), ориентировка осей напряжений близка к слою 1. Здесь преимущественно развиты нарушения сбросового типа; в слое 2, более пластичном, должны преобладать надвиги и взбросы; 4 — верхняя мантия; 5 — ось растяжения; 6 — ось сжатия. Тонкие линии — изолинии плотностей гипоцентров землетрясений. Красные стрелки — направление перемещения вещества.

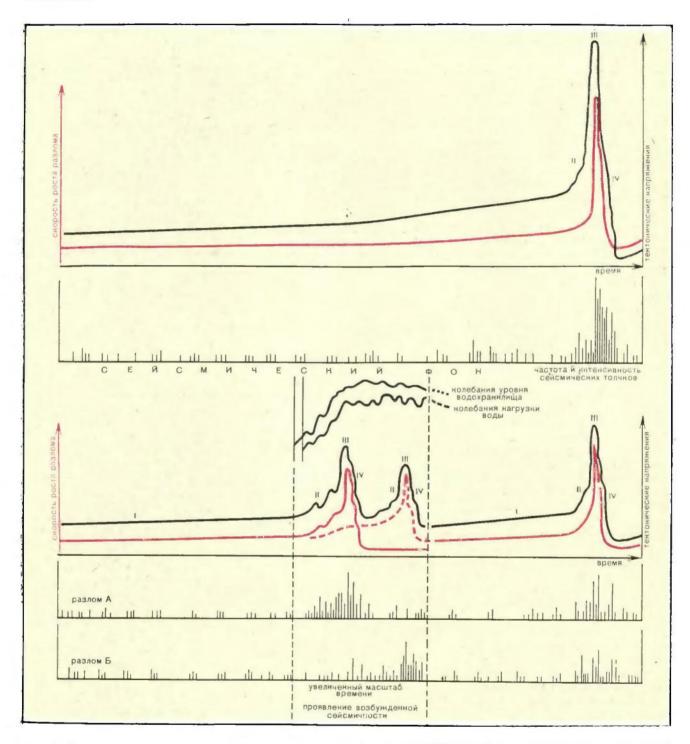


Рис. 6. Принципиальная схема предполагаемых изменений скорости деформаций и тектонических напряжений, влияние действия созданного водохранилища на разломы вего зоне. При естественном развитии процессов в ходе длительного времени (в верху) могут быть выделены стадии: I—подготовки разрыва, развития мелких обособленных разрывов, предварительных слабых толчков (сейсмического фона), II—проявления форшоков, III—возникновения крупного разрыва, главный толчок зелетрясения, IV—перераспределения напряжений, разрастания крупного разрыва, проявления афтершоков. Под влиянием действия созданного водохранилища (в ни зу) напряжения в земной коре достигают предела прочности значительно и разрешаются в виде частичных землетрясений. Интенсивность естественного землетрясения будет значительно снижена. «Созревание» различных разломов А и Б может произойти в разное время.

пряжений и с образованием очагов землетрясений.

Так же объясняется возникновение землетрясений в районе подземных ядерных взрывов в штате Невада, США (рис. 12). Интересно, что и здесь положение эпицентров целиком контролировалось геологической структурой и было несимметрично по отношению к очагу взрыва.

Теория этого вопроса достаточно сложная и не может быть освещена в данной статье. Но на некоторых моментах остановиться необходимо.

Очагом, возбуждающим сейсмический толчок в районе водохранилища, очевидно, будет та точка (объем) в земной коре, где образуется разрыв, поскольку напряжение превышает прочность пород. Судя по энергии толчков можно думать, что образующиеся трещины и разрывы, приводящие к землетрясению, измеряются миллиметрами и метрами, реже десятками и сотнями метров, или они вызываются смещением крупных блоков в земной коре и тогда масштаб их может быть очень большим. Схема развития разрыва сложна. Установлено, что поверхность скола в образце формируется не сразу, а постепенно, за счет разрастания многочисленных мелких трещин в ослабленных участках, и сопровождается выделением небольших порций сейсмической энергии. Это подготовительная стадия формирования разрыва. Перед окончательным оформлением поверхности скола ненарушенными остаются лишь ничтожно малые по площади участки, напряжение в которых сильно возрастает, а прочность оказывается равной прочности горных пород.

Если водохранилище создается в такого «созревшего» потенциального разлома, воздействие порового давления может оказаться эффективным. Исследования показачто площадь действительного контакта твердой фазы в пределах поверхности скола будет всегда во много раз меньше площади кажущегося контакта. При этом существенное влияние на площадь действительного контакта в сторону ее уменьшения может оказывать сама вода, пленка которой проникает в мельчайшие трещины, создавая в местах их сужения расклинивающее давление в сотни и даже тысячи атмосфер (Н. А. Ребиндер, 1962). Такое расклинивающее действие абсорбционных пленок, образованных молекулами поверхностно-активных веществ и ионами электролитов, способствует развитию микротрещин.

Окончательному разрушению образца противодействуют силы трения, на которые влияют эффективное напряжение и коэффициент трения в плоскости скола. Поэтому, уменьшая эффективное нормальное напряжение (5 - р), давление жидкости самостоятельно не может вызвать заметного трения. По мере же увеличения давления воды величина естественного напряжения, способного вызвать скольжение или деформацию, значительно уменьшается, Происходит быстрое разрушение перемычек между ранее образовавшимися разрывами. Процесс развивается лавинообразно, так как разрушение каждой перемычки приводит к повышению напряжений в остальных, еще не разрушенных перемычках.

Таким образом, увеличение порового давления приводит к уменьшению прочности породы настолько, что оказывается возможным образование разрыва при напряжениях, которые уже были в массиве горных пород, но которые до создания водохранилища не могли его вызвать. Эта стадия — кратковременная, и создание водохранилища ускоряет процесс формирования разрыва, скола, который сопровождается наиболее сильным землетрясением.

Следующей стадией нужно считать постепенно замедляющееся прерывистое разрастание разрыва при перераспределении напряжений в очаге землетрясения и приспособление массива пород к произошедшему быстрому смещению. При этом проявляются последующие сейсмические толчки типа афтершоков. На этой стадии и завершается формирование очагов возбужденных землетрясений.

Наличие структурных неоднородностей в массиве горных пород (в частности древних разломов) влияет на ориентировку и величину действующих напряжений. Эти влияния изучают на моделях. Были получены разные соотношения между разрывами и данным полем напряжений. Возмущение поля напряжения зависит от формы разрывов и их ориентировки по отношению к направлениям главных напряжений (рис. 13).

Места повышения величины касательных напряжений, вызванные структурными неоднородностями, сопоставимы с увеличением сейсмической активности типа возбужденных землетрясений. Поэтому при прогнозе мест, где может возникнуть возбужденная сейсмичность, необходим структурный контроль. Наиболее действенным методом такого контроля должен стать анализ напряженного состояния земной коры и изменения его во времени, особенно после возникновения сильных землетрясений в пределах разных порядков неоднородностей земной коры. При этом существенное значение должен играть механизм деформации земной коры, который определяется морфологией деформируемых участков, кинетикой деформации, внутренним напряженным состоянием и другими факторами. Конкретный анализ изменения поля тектонических напряжений, вызванного различными неоднородностями земной коры, в частности разрывами — концентратами напряжения, позволяет прогнозировать места очагов возбужденной сейсмичности.

проявлении возбужденной сейсмичности во время заполнения водохранилищ чаще всего осуществляется комбинация двух основных рассмотренных механизмов. И не следует забывать, что все механизмы проявляются в условиях накопленных действующих тектонических напряжений. Поэтому вода водохранилища (при создании определенных градиентов напора) действует как «спусковой» механизм естественных напряжений. По-видимому, можно научиться регулировать выделение энергии путем регулирования объема и уровня воды водохранилища при его заполнении.

#### Две новых идеи

Две новых идеи, две гипотезы появились как результат разработки указанных моделей механизмов возбужденной сейсмичнести: были предложены методы предотвращения раз-

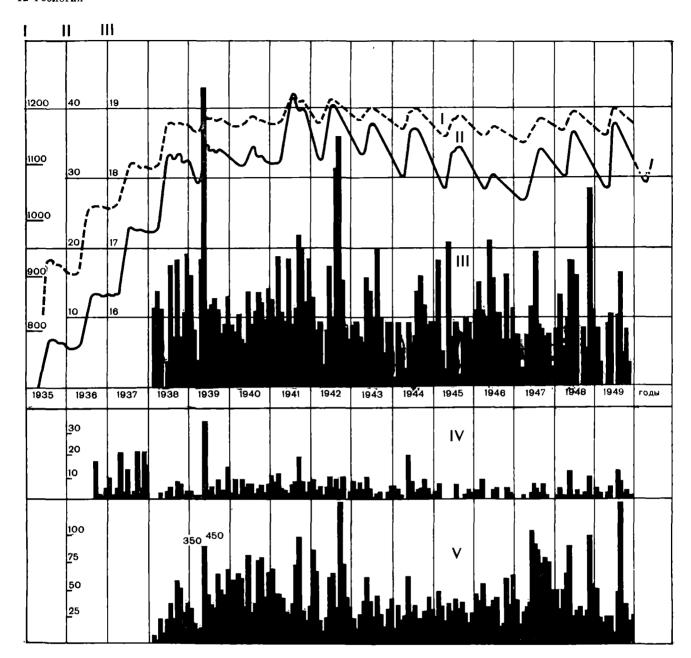


Рис. 7. Сопоставление землетрясений с колебаниями уровня воды в водохранилище Мид (США) с 1939 по 1949 г. I — уровень воды в водохранилищах (в футах), II — нагрузка (в млрд т), III — эпергия землетрясения (в эргах), IV — ощущавшиеся землетрясения, V — землетрясения, ваписанные сейсмографом. Режим (временные флуктуации) землетрясений, связанных с возбужденной сейсмичностью, достаточно индивидуален в разных водохранилищах. Однако в некоторых из них устанавливается четко выраженная корреляция между сезонными колебаниями уровня воды и изменениями нагрузки, выделениями сейсмической эпергии и зарегистрированными толчками. Такая связь отмечена для озер Марафон (Греция), Кариба (Африка), Белеча (Югославия), Войонт (Италия) и др.

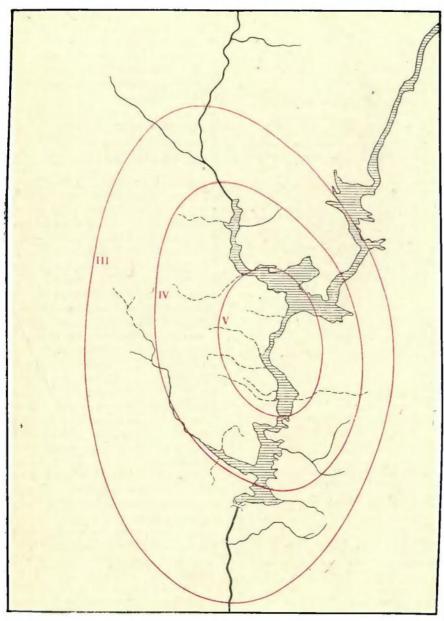


Рис. 8. Карта изосейст землетрясения 6 июня 1962 г., связанного с плотиной Каняльес в Испании (по Фонсере). Интенсивность III, IV и V баллов.

рушительных землетрясений и методы их предсказаний. Когда выявилось значение внутрипорового давления, была высказана мысль, что принцип увеличения давления жидкости для освобождения упругой волновой энергии может найти практическое применение для предупреждения природных землетрясений. Д. Эванс предложил освобождать сейсмическую энергию искусственно, путем инъекции воды под давлением в поры горных пород.

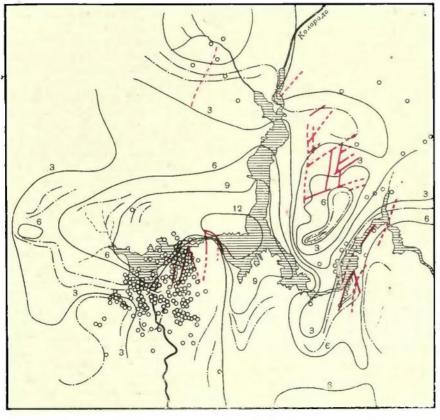
После постройки земляной плотины Кремаста высотой в 147 м и создания водохранилища произошло сильное землетрясение. Греческие исследователи расценили его именно с позиций Эванса. Они считали, что в районе строительства плотины уже существовало тектоническое напряжение, и наполнение водохранилища совпало с моментом, когда эти напряжения были готовы освободиться. По мнению П. Комнинаксиса (1968), именно строительство плотины и проявление возбужденной сейсмичности было спасительной разрядкой естественных напряжений.

Научно-исследовательский центр по предотвращению разрушений (Япония) провел работы в районе г. Минаками, где наблюдались землетрясения. В скважину глубиной 1800 м под давлением закачивалась вода. Количество толчков до инъекции в среднем составляло 2; а через 223 час. после начала инъекции резко увеличилось. В течание всего времени инъекции воды землетрясения продолжались. При этом место возникновения толчков постепенно смещалось, а глубина все увеличивалась. После окончания инъекции произошло ослабление сейсмической активности.

Наконец, Д. Кардером совсем недавно была высказана мысль, что искусственное освобождение упругой волновой энергии на городских территориях, в которых существует опасность природных землетрясений, может предотвратить образование одного большого разрушительного землетрясения. Несколько позже была предложена и обратная рекомендация — уменьшить давление жидкости в разломах, погребенных под водохранилищем, путем выкачивания ее из зоны разломов.

Вторая гипотеза заключается в том, что предвестниками землетрясений могут явиться изменения давления жидкости, которые вполне поддаются измерению. Результаты экспериментов показали, что по мере того как образец породы подвергается давлению и в нем накапливается напряжение, поровое давление постепенно увеличивается до некоторой максимальной величины. Когда же проявляется микротрещиноватость, объем пор и трещин увеличивается и поровое давление относительно быстры уменьшается до момента разрушения образца.

Примером может явиться недавнее землетрясение в юго-западной части Австралии с M=6,9 и глубиной очага  $\sim 8$  км. Скважины, расположенные в 110 км западнее эпицентра, глубиной 40 м дали подъем уровня воды



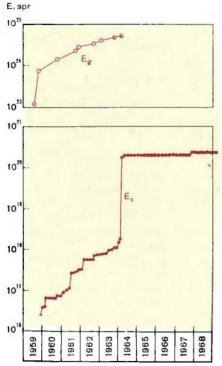


Рис. 9. Изолинии скоростей современных движений земной коры по данным повторных нивелировок (цифры — опускания в см) и эпицентры локальных землетрясений (кружки) на оз. Мид (США). Красные линии — разломы, пунктир с точкой — промежуточные изолинии скоростей современных движений.

Рис. 10. Выделившаяся сейсмическая энергия  $E_s$  за 1959—1968 гг. под влиянием веса воды водохранилища  $\mathit{Ксриба}$  (Африка) и примегающих к нему участнов в сопоставдении соответствует вычисленной граватационной гнергии  $E_s$ , освобожденной при опускании земной коры.

в водоносном слое на величину 29,2 мм за 1,5 часа до землетрясения. Таким образом, наблюдения над колебаниями водоносных горизонтов могут быть использованы как индикатор напряжений, возникающих перед землетрясением.

## Дискретное сейсмическое районирование

Для установления изменений природной сейсмичности под воздействием инженерной деятельности человека необходимы выявленные и твердо установленные данные по сейсмотектоническим связям, сейсмическому районированию. Однако на существующих картах сейсмичность отражается в виде осредненных значений по площади, показывающих обобщенную картину распределения сейсмичности в пространстве. При таком подходе остается неопределенным истинное, почти всегда дискретное распределение эпицентров. Существующие же карты с дискретным показом эпицентров, фиксируя уже произошедшие землетрясения, никак не отражают вероятности возникновения землетрясений данной силы в той или иной точке.

В настоящее время выделение квазиоднородных участков, характеризующихся определенным значением максимальной силы возможного землетрясения, в большей мере основывается на интуиции исследователя и часто определяется степенью его квалификации.

Рассмотрение карт сейсмической активности, плотности эпицентров и карт эпицентров землетрясений показывает, что в пределах сейсмоактивной области выделяются участки, где эпицентры землетрясений отсутствуют. Обычно это связывают с неполнотой наших знаний о сейсмичности района, малым сроком инструментальных наблюдений. Но при сейсмическом районировании такие «окна» приравниваются к соседним высокосейсмичным областям.

Специальный количественный анализ, проделанный в лаборатории неотектоники МГУ для различных сейсмоактивных областей СССР, показал закономерное наличие таких «окон»,

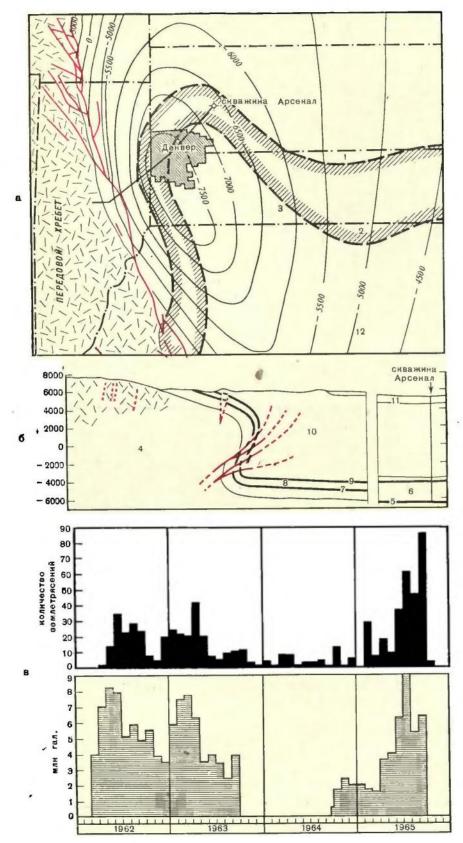


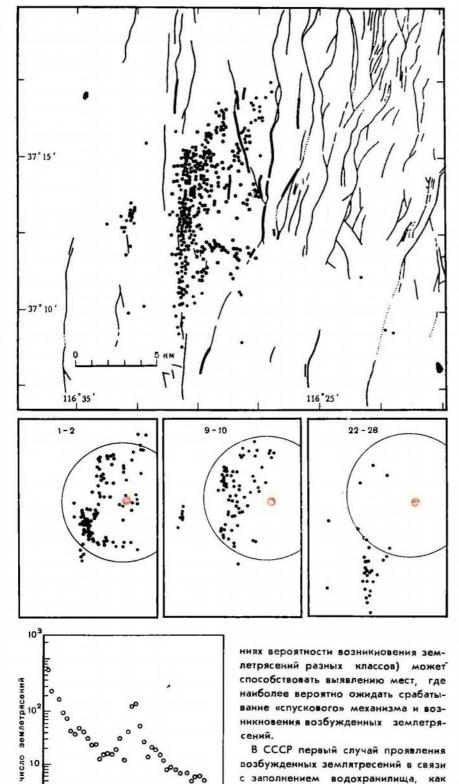
Рис. 11. Возбужденная сейсмичность в Денверской впадине (США), вызванная инъекцией жидкости в скважину Арсенал, показанная на структурной карте (а) и геологическом профиле через краевую часть впадины (б). 1 — граница пенсильванских пород, перекрывающих докембрий-ские, 2— граница распространения кембрийско-ордовикских пород, 3распространение миссисипских пород, 4 — гранито-гнейсы докембрия, 5 — кембрийско-ордовикские породы, 6 — пенсильванские, 7 — пермские, 8 — триасовые, 9 — юрские, 10 — меловые, 11 — третичные породы, 12 изолинии поверхности докембрия (в футах); в — объем жидкости (в галлонах), инъецируемой в скважину Арсенал (внизу), почти полностью коррелируется с количеством землетрясений (в верху).

в которых сейсмическая опасность будет определяться лишь эффектом землетрясений, возникающих в соседних участках. Качественно такие участки выделяются нами в пределах сейсмических областей Альпийской зоны Европы, В пределах «окон», границы которых могут быть уточнены, возникновение эпицентров землетрясений можно с достаточной степенью вероятности считать невозможным. На картах сейсмического районирования эти участки будут выделяться пятнами резко пониженной балльности. С другой стороны, в районах древних платформ, считавшихся асейсмичными, могут быть выделены области повышенной балльности.

Все это показывает, что необходимо пересмотреть принятый в настоящее время метод районирования и перейти к составлению карт дискретного сейсмического районирования.

Практическая ценность выделения подобных «окон» на картах дискретного сейсмического районирования не требует объяснений. Учет их позволит, во-первых, значительно сократить общую площадь опасных территорий, находящихся в пределах сейсмических зон. А это значительно удешевит строительство. И, во-вторых, появится возможность выявить сейсмоопасные зоны в пределах древних платформ, ранее считавшихся асейсмичными.

Составление карт дискретного сейсмического районирования (в изоли-



15

30

уже говорилось, произошел в среднем течении р. Вахш на Нурекской

плотине. Располагается насыпная пло-

Рис. 12. Возбужденная сейсмичность в районе подземного ядерного взрыва в штате Невада (США). Вверх у - при взрыве в эпицентре (красный кружок) образуются землетрясения (показаны точками) и разломы, возникшие после взрыва (жирные линии). Тонкими линиями показаны разломы, закартированные до взрыва. В середине — карты эпи-центров землетрясений, показывающие миграцию сейсмической активности в зависимости от количества дней, прошедших после взрыва: 1-2. 9-10 и 22-28. Центр круга соответствует месту взрыва на полигоне с радиусом 5 км. Внизу — график количества землетрясений в день с M > 1.3 (M - магнитуда).

тина в Пулисангинском ущелье, ее проектная высота — 300 м. Она должна создать озеро длиной 75 км, с объемом воды порядка 10 км<sup>3</sup>. Этот район характеризуется сложным тектоническим строением. Вахш здесь протекает в Таджикской впадине, заполненной мезозойско-палеогеновыми и неоген-четвертичными морскими и континентальными осадочными отложениями. Сложность тектонической структуры определяется и специфическими формами соляной тектоники.

До постройки плотины этот район отличался большой сейсмичностью и относился к зоне 8-9 балльных землетрясений. Землетрясения случались здесь 3-4 раза в декаду. При заполнении водохранилища первой очереди во второй половине 1972 г. сейсмическая активность резко повысилась. Некоторые эпицентры землетрясений были зарегистрированы непосредственно под озером. В радиусе 5 км от водохранилища число слабых землетрясений увеличилось в 10 раз. Когда уровень воды достиг 100-метровой отметки, их количество увеличилось до 30-40 в декаду. Помимо этого, увеличились количества землетрясений с магнитудой 4-4,5 и на расстоянии 15 км от водохранили-

Поэтому очень важно вести здесь (да и в других местах) наблюдения не только в пределах плотины и водохранилища, но и на окружающей территории, близкой в структурном отношении к району водохранилища. Такой анализ позволит прогнози-

Рис. 13. Схема последовательного (от а до к) влияния ориентировки и формы ранее образованных разрывов на величину максимальных касательных напряжения (по М. В. Гзовскому). Наиболее неблагоприятными, «опасными» следует считать разрывы, расположенные под углом 45° к направлению действия  $\sigma_3$ — оси сжатия, и выпуклые участки разрывов, направленные в сторону действия  $\sigma_3$ . I— направление общего наибольшего равномерного сжатия; 2— ранее образованные разрывы; 3— сильное и 4— слабое уменьшение напряжений; 5— отсутствие влияния; 6— слабое и 7— сильное увеличение напряжений. Совершенно очевидно, что разрешение данных вопросов требует разработки и установления надежных методов оценки напряжения в земной коре.

ровать динамику процесса возбужденной сейсмичности и установить характер и время относительной стабилизации.

Естественно, что изучение механизма возбужденных землетрясений становится необходимостью.

Связь землетрясений с нагрузкой воды крупных водохранилищ в разных частях земного шара стала предметом озабоченности исследователей разных стран и вызвала значительный международный интерес. Совершенно ясно, что мы столкнулись с явлением, в котором техническая деятельность человека предстает как грандиозный эксперимент непосредственно в природных условиях. И было бы совершенно непростительным не воспользоваться этим экспериментом для изучения самого явления. Мы сможем значительно лучше понять природу землетрясений и, несомненно, получим возможность предсказывать и контролировать не только сами события, но и их послед-

УДК 550.34; 628.113

#### Рекомендуемая литература

**Н. Г. Киссин.** О ПРОБЛЕМЕ ЗЕМЛЕ-ТРЯСЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ИНЖЕНЕР-НОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ. «Совет. геология», 1972, № 2.

**Н. И. Николаев.** ВОДОХРАНИЛИЩА И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ. «Изв. АН СССР, сер. физика Земли», 1972, № 8.

Н. Н. Николаев. УСИЛЕНИЕ РЕГИО-НАЛЬНОЙ И ЛОКАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧ-НОСТИ, СВЯЗАННОЙ С ЗАПОЛНЕНИ-ЕМ КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ. В сб.: Неотектоника, новейшие отложения и человек. Изд. МГУ, 1973.