



Ю. М. ПУЩАРОВСКИЙ,  
В. Г. ТРИФОНОВ

## ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ СЕЙСМИЧНОСТИ

Катастрофическое Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г. в Северной Армении, унесшее десятки тысяч человеческих жизней и причинившее разрушения, которые оцениваются в миллиарды рублей, в очередной раз продемонстрировало несовершенство Государственной карты сейсмического районирования СССР. Интенсивность сотрясений при этом событии оказалась в отдельных местах на 2–3 балла больше, чем было показано на карте. Двенадцатью годами раньше такая же ошибка выявилась в районе сильных Газлийских землетрясений в Узбекистане, а еще раньше ошибочно была оценена балльность района Ашхабадского землетрясения 1948 г., число жертв которого достигло 110 тыс. Эти и другие подобные ошибки, не столь известные, отчасти объясняются разнообразием условий возникновения землетрясений, технической отсталостью сейсмической службы страны, а иногда и недостаточной принципиальностью ученых-составителей карты, снижающих балльность под давлением строительных ведомств. Но несомненны также пороки самой методики составления карты. И главным из них представляется недооценка геолого-тектонических критериев сейсмичности того, что называют сейсмотектоникой, то есть знаний о геологической среде и ее современной активности. Хотя авторы карты сейсмического районирования и декларировали, что опирались при ее составлении на сейсмотектонические критерии, на самом деле в большинстве случаев решающей была сейсмостатистика: анализ уже происшедших землетрясений, и прежде всего тех, которые случились в период инструментальных наблюдений. Даже если оставить в стороне недостаточность срока их проведения, не превышающего в большинстве регионов мира 100 лет, сам принцип подобного анализа ретроспективен, и это неминуемо ограничивает прогностическое значение карты.

Еще в 1951 г. И. Е. Губин [1], опираясь на ранее высказанные соображения И. В. Мушкетова, убедительно показал связь сильных землетрясений с новейшими разломами, обнаруживающими признаки современной

© Авторы работают в Геологическом институте АН СССР. ПУЩАРОВСКИЙ Юрий Михайлович - академик, советник при дирекции. ТРИФОНОВ Владимир Георгиевич — доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией неотектоники и космической геологии.

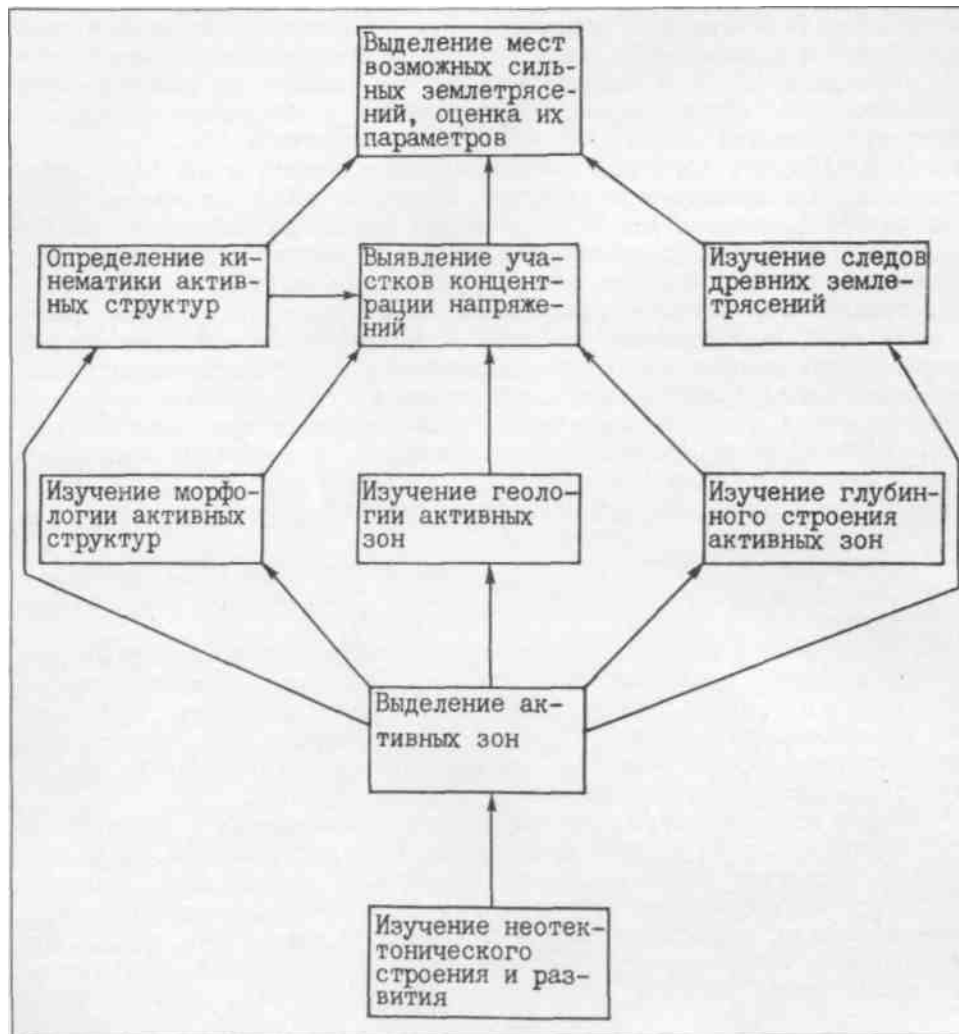
активности. В дальнейшем появилась идея: по совокупности геолого-тектонических и сейсмических данных выделять зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) и использовать их как основу для сейсмического районирования. Исследования, предпринятые в последние 25 лет в Институте земной коры СО АН СССР, Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта АН СССР и Геологическом институте АН СССР, подтвердили, что геолого-тектонические критерии могут применяться не только при выявлении зон ВОЗ, но и при оценке их сейсмического потенциала, средней повторяемости ожидаемых землетрясений, их разрушительных последствий. Для решения указанных задач необходимо знать интенсивность и режим тектонических движений в течение последних тысячелетий, геологическое строение и механические свойства горных пород. Такие знания могут быть получены в ходе комплексных геологических, геоморфологических, геофизических, геодезических, петролого-геохимических и гидрогеологических исследований с привлечением также аэрокосмических, историко-археологических и геоботанических данных. Разумеется, подобный подход к выделению зон ВОЗ нуждается в знании параметров происшедших землетрясений и результатов инструментального изучения сейсмичности.

Технология геолого-тектонических исследований для определения характеристик сейсмоопасных зон [2] может быть представлена в виде трехэтапной схемы (рис. 1).

Первый этап — выявление областей контрастных и интенсивных движений в течение последних миллионов лет. Поскольку за столь длительный срок в некоторых местах происходили перестройки структурного плана, изменялась интенсивность движений, необходимо изучать тенденции их неотектонического развития. Это позволяет наметить области, где современная тектоническая активность наиболее вероятна.

Второй этап — обнаружение, изучение и картирование в таких областях активных структур, прежде всего зон активных разломов. К их признакам относятся интенсивные и контрастные современные движения земной поверхности; современная сейсмичность; некоторые виды газовых, геохимических, гидрохимических и геотермальных аномалий, иногда проявляющихся в особенностях растительности и увлажнения поверхности; аномалии силы тяжести и электромагнитных свойств горных пород. Однако для современных движений литосферы характерны разнообразие и неравномерность: в одних структурах они происходят плавно, в других импульсно — при сильных землетрясениях, разделенных эпохами покоя или медленных движений. В такие эпохи многие проявления современной активности ослабевают, что может создать ложное представление об интенсивности движений и сейсмической опасности изучаемой зоны. Поэтому решающее значение приобретает исследование голоценовой тектоники (последние 10 000 лет). В эту эпоху отдельные зоны обязательно проявляют свою активность [3].

Что же касается стабильных территорий, таких как Подмосковье, то здесь для оценки относительной активности отдельных зон необходимо привлекать данные за более длительное время — голоцен и поздний плейстоцен (последние 100 000 лет), а также учитывать особенности распределения более ранних тектонических подвижек. Как показали Р. Е. Уоллес в США [4, 5], А. А. Никонов [6] и В. Г. Трифионов [3, 7]



**Рис. 1. Последовательность геологических работ для сейсмического районирования и оценки сейсмической опасности**

в СССР, а сейчас и многие другие исследователи в разных странах, изучение голоценовых тектонических нарушений и деформаций земной поверхности на основе детальных наземных наблюдений, анализа материалов аэрокосмических съемок позволяет не только обнаруживать активные разломы, но и получать весьма точные данные об интенсивности движений, их пространственном распределении.

Третий этап дифференциация активных зон и их участков по силе землетрясений и частоте их генерации. Для решения этой задачи могут быть предложены два способа, которые желательно сочетать, чтобы повысить точность результатов.

Первый способ по существу сейсмостатический, но учитывающий больший, чем возможно только по сейсмологическим данным, интервал времени. Чтобы расширить временной интервал, прибегают к историческим свидетельствам и археологическим данным, успешность применения которых была продемонстрирована И. В. Ананьиним для Русской равнины и А. А. Никоновым для некоторых горных областей СССР. Там, где подобных данных нет или их недостаточно (а таковы большинство сейс-моопасных регионов страны), используются геолого-геоморфологические методы. Труды В. П. Солоненко, Н. А. Флоренсова, В. К. Кучая, А. А. Никонова, В. С. Хромовских и ряда других советских исследователей разработана методика изучения сейсмодислокаций остаточных деформаций земной поверхности, созданных сильными землетрясениями прошлого. В последние годы обнаружены следы сильных землетрясений и в морфологии самих активных разломов. Метод их выявления основан на доказательстве дискретности, а стало быть, импульсности подвижек по разлому и радиоуглеродном определении возраста молодых наносов, смещаемых или образующихся в результате таких подвижек. Этим методом удалось, например, доказать, что весьма сильные землетрясения повторяются через 700—800 лет в южной части Таласо-Ферганского разлома Тянь-Шаня и примерно через 600 лет в зоне Хангайского разлома Северной Монголии [2, 7].

В целом геолого-сейсмостатический способ хорош тем, что позволяет не только определять сейсмоопасные зоны, участки зон и среднюю повторяемость сильных землетрясений в них, но и предвидеть некоторые реальные последствия их разрушительного воздействия. Но этот способ требует детальнейших исследований и применим не во всех геологических или ландшафтных условиях.

Второй способ универсальный, хотя и менее точный. Он основан на выделении тех активных зон и их участков, где в большом объеме горных пород возможна высокая концентрация современных тектонических напряжений, их последующая быстрая разрядка. Для этого необходимо знать прочностные свойства горных пород, зависящие как от их состава, так и от степени раздробленности. Эти характеристики для очагов землетрясений глубиной в первые километры могут быть получены путем геологической съемки, а лучше объемной геологической съемки, сочетающей обычное картирование с геофизическими работами и большими объемами бурения. Некоторые сведения о современной раздробленности дает и изучение морфологии активных разломов: сильные землетрясения чаще приурочены к компактным зонам, чем к зонам многочисленных нарушений, рассредоточенных на большой площади.

Знание морфологии и направления смещений по активным разломам помогает конкретизировать место возможного толчка. В зонах сбросов, где вертикальные смещения сочетаются с поперечным растяжением, и в зонах сдвигов, где наблюдаются продольные горизонтальные движения, сильные землетрясения чаще всего случаются в непосредственной близости к главному разлому. В активных зонах, в которых одно крыло разлома надвигается на другое (сжатие и укорочение поверхности), сильные землетрясения обычно приурочены к второстепенным нарушениям (землетрясения Уайт-Волф 1952 г. и Сан-Фернандо 1971 г. в Калифорнии, Хаитское землетрясение 1949 г. в Таджикистане) или происходят перед

фронтом главного надвига (землетрясения Ассамские и Кангри перед Главным пограничным разломом Гималаев). Спитакское землетрясение 1988 г. в зоне активного Памбак Севанского сдвига, характеризующегося значительной надвиговой компонентой смещений, подтверждает указанную особенность: оно произошло по второстепенному сдвигу-надвику, расположенному перед фронтом главного разлома.

Для определения участков активных зон, где возможны глубокие коровые землетрясения, решающее значение имеет знание глубинного строения территории. Оно изучается геофизическими методами с привлечением геолого-геоморфологических, аэрокосмических и газогидрогеохимических данных. Вероятность сильных землетрясений возрастает в активных зонах, выраженных на поверхности лишь косвенными признаками и скрытых на глубине под слабдеформированными породами, толщами, надвинутыми сбоку, или слоем земной коры с иным стилем активной тектоники. На границе слоев с разными стилями современной тектоники, в частности с разными направлениями разломов, концентрируются напряжения, происходят срывы по субгоризонтальным плоскостям, что само по себе может стать причиной землетрясений. Но наиболее сейсмоопасны, как показали Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. [2, 8], участки, на которых смыкаются зоны, активные на разных уровнях земной коры. Эта особенность обнаружена и в других активных регионах. Если не во всех, то во многих случаях она объясняет ранее подмеченную геологами и геоморфологами приуроченность очагов землетрясений к узлам пересечения активных разломов.

Предлагаемая методика и технология использования геолого-тектонических данных для выделения и оценки зон ВОЗ представляется оптимальной. Уже составлены Карта активных разломов СССР и сопредельных территорий в масштабе 1 : 8 000 000 и объяснительная записка к ней [9], а также детальные карты сейсмоопасных регионов. Заканчивается работа над Картой активных разломов СССР в масштабе 1 : 5 000 000. Международная рабочая группа Межсоюзной Комиссии по литосфере, объединяющая ученых 27 стран (председатель В. Г. Трифонов), приступила к составлению Карты активных разломов мира в масштаб 1 : 10 000 000 и более детальных карт отдельных континентов, сейсмоопасных регионов. Эта работа явится вкладом сеймотектоников в объявленную ООН на 1990-е годы Международную декаду уменьшения опасности природных бедствий.

Вместе с тем использование этой технологии для площадного изучения современной и голоценовой активности вне описанных зон встречает ряд трудностей. На данные только инструментальных геодезических наблюдений в большинстве регионов опираться нельзя из-за краткости и потому непредставительности периода наблюдений. Да и сама сеть таких наблюдений дорога, редка и недостаточна для надежных заключений. Площадное геолого-геоморфологическое изучение проявлений голоценовых тектонических движений также доступно не везде, поскольку в ряде мест нет надежных природных реперов. В таких регионах приходится привлекать данные о движениях за более длительные интервалы времени — десятки и сотни тысяч лет, что снижает надежность оценок современной активности. Однако для некоторых грубых оценок высокая точность даже не нужна, например, для того чтобы, вопреки распространяемым в по-

следнее время слухам, утверждать: в районах, подобных Москве, невозможны разрушительные землетрясения интенсивностью 5 баллов и больше.

Реализация предлагаемой технологии связана с необходимостью унификации методов исследования и получения количественных оценок. Здесь следует обратить внимание на формализованные критерии оценок состояния и современной активности геологической среды, предложенные в трудах Г. И. Рейснера, В. К. Кучая и ряда других исследователей. Эти критерии делают возможным компьютерный анализ геолого-геофизических данных. Вместе с тем требования унификации не следует абсолютизировать. Например, одни и те же результаты изучения глубинного строения сейсмоопасных зон могут быть получены с помощью различных геофизических методов. Различно и значение сейсмостатистики при выявлении и определении сейсмических характеристик зон ВОЗ. Оно больше в районах с частыми землетрясениями, чем в относительно стабильных областях, где обычно приходится опираться на геолого-тектонические аналогии.

Говоря о сейсмическом районировании и оценке опасности сильных землетрясений, нельзя не затронуть еще двух вопросов.

Во-первых, сейсмическое районирование всякого рода, в том числе и основанное на широком привлечении геолого-тектонических данных, отражает наиболее вероятное развитие сейсмичности в регионе. Оно полезно для планирования гражданского строительства и землепользования, но недостаточно для сооружения особо важных народнохозяйственных объектов АЭС, крупнейших гидротехнических сооружений, химических и прочих предприятий, разрушение которых может вызвать серьезные экологические последствия. Планирование и строительство таких объектов должно осуществляться, по нашему мнению, в расчете на маловероятные, но тем не менее возможные сейсмические события. Стандартное повышение «запаса прочности» конструкции, например на балл, может оказаться недостаточным. Поэтому в каждом конкретном случае требуются специальные изыскания.

Во вторых, различные геологические бедствия, в том числе и землетрясения, определяются сочетанием разнообразных, взаимозависящих факторов (рис. 2) и потому могут влиять друг на друга. Иначе говоря, землетрясение, малоразрушительное само по себе, может возбудить другие, более опасные в конкретном случае геологические процессы.

Простейший пример такого взаимодействия — Гиссарское землетрясение 23 января 1989 г. в 30 км юго-западнее Душанбе в Таджикистане. Землетрясение приурочено к зоне влияния Илякского активного разлома и, в общем-то, было вполне ординарным для этого высокосейсмичного района (магнитуда землетрясения 5,5). Однако вблизи его эпицентра широко распространены молодые лёссовидные толщи, способные к оползанию. Эту способность резко повысило обводнение толщ дождями и неквалифицированным отводом воды из проходящего неподалеку оросительного канала. В итоге сейсмического толчка оказалось достаточно, чтобы вызвать крупный оползень, погубивший более двухсот человек.

Взаимосвязь и взаимовозбуждение стихийных бедствий заставляют по новому взглянуть на геологические условия строительства и эксплуа-

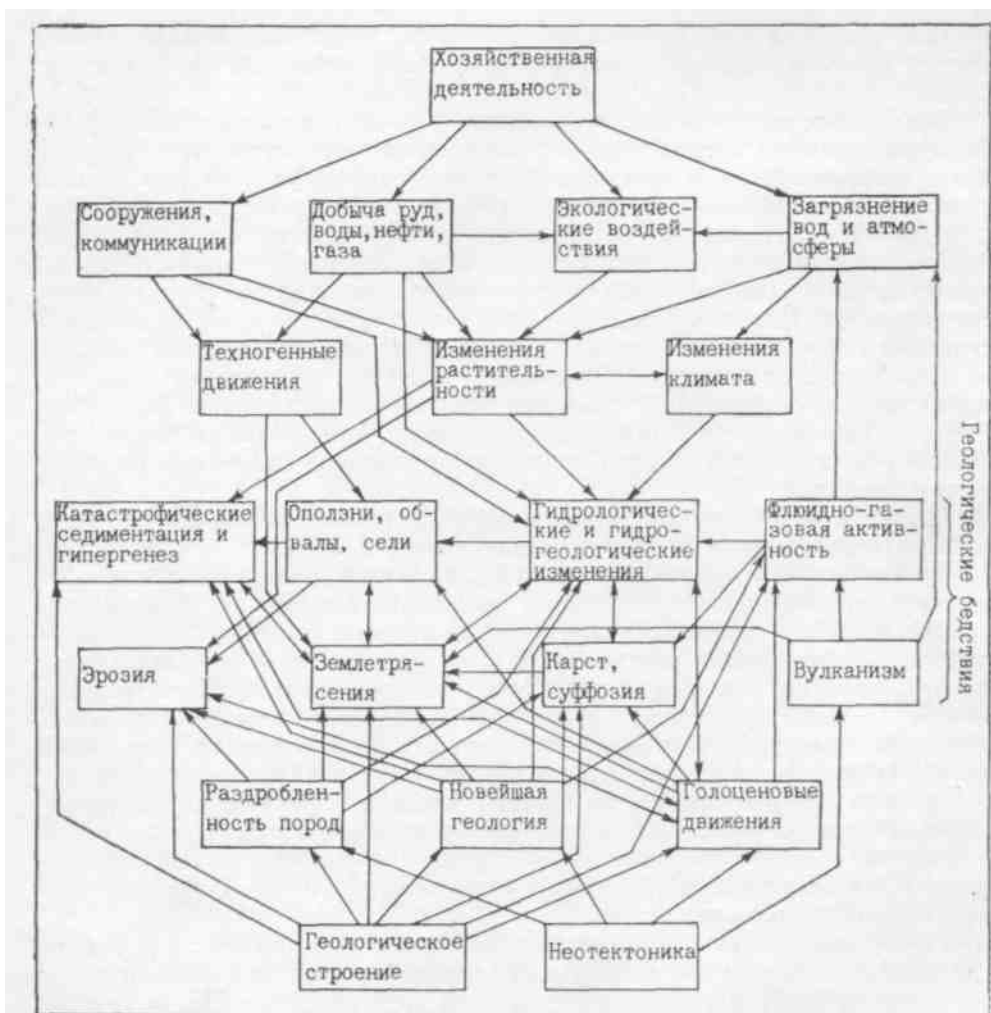


Рис. 2. Стихийные бедствия в системе современных геологических процессов

тации ряда важнейших народнохозяйственных объектов. Рассмотрим лишь два примера.

В Таджикистане на реке Вахш возводится высочайшая (335 м) Рангунская плотина<sup>1</sup>, которая создаст водохранилище объемом более 13 км<sup>3</sup>. Район строительства располагается на границе Южного Тянь-Шаня с Внешней зоной Памира, характеризующейся интенсивными, контрастными современными и недавними тектоническими движениями. Здесь сближаются и смыкаются крупнейшие активные разломы региона. В зоне одного из них, Гиссаро Кокшаальского, в этом столетии на

<sup>1</sup> Недавно принято решение понизить проектный уровень воды в плотине на 100 м, но эта мера недостаточна, чтобы предотвратить стихийное бедствие.

расстоянии не более 100 км от строящегося гидроузла произошли землетрясения с магнитудами 7,3 7,4 и интенсивностью сотрясений 9 10 баллов. Землетрясения столь же высокой интенсивности возможны и непосредственно в районе строительства. Однако движения по разломам наблюдаются не только во время землетрясений. Как показывают повторные геодезические измерения, они продолжаются сейчас, и, поскольку один из разломов проходит непосредственно через плотину, это может понизить ее прочность.

В районе постоянно происходят оползни, а среди подобных древних образований с возрастом тысячи десятки тысяч лет известен даже оползень, запрудивший на время долину Вахша. По мере наполнения водохранилища возрастет обводнение пород и оползневая опасность увеличится. Катастрофический вынос в водохранилище обвально-оползневого материала при сильном землетрясении вызовет грандиозное волнение воды и создаст опасность разрушения плотины и сброса большого объема воды в расположенное ниже по течению Вахша Нурекское водохранилище с собственным объемом воды более 5 км<sup>3</sup>. Весьма вероятное при таком событии разрушение Нурекской плотины привело бы к затоплению густонаселенных долин низовий Вахша и верховий Амударьи, к колоссальной социально-экологической катастрофе.

Другой пример район строительства Крымской АЭС на мысе Ка-зантип Керченского полуострова. Вдоль его северного берега в Азовском море, всего в 10 км от строящейся АЭС, проходит крупный активный Южно-Азовский разлом. В зоне его влияния А. А. Никонов обнаружил предполагаемые следы античных землетрясений с интенсивностью сотрясений 8 9 баллов. АЭС сооружается на склоне удлиненного новейшего купола, в ядре которого выявлены признаки диапиризма нагнетания и прорыва пластичных глин, насыщенных водой и газами. По существу, это явление грязевого вулканизма, известного и в других частях Керченского и Таманского полуостровов. Его воздействие на сооружения АЭС по своим разрушительным последствиям может превзойти ожидаемые сейсмические воздействия. Заслуживает внимания в связи со строительством АЭС характер многокилометрового чехла Керченского полуострова. На 90% он сложен глинистыми породами, многие из которых насыщены сульфидами, образовавшимися в условиях зараженного сероводородом полузамкнутого водоема, подобного современному Черному морю. Окисляясь подземными водами, сульфиды переходят в гипс минерал большего объема, что создает высокое дополнительное сжатие пород. Их растрескивание под действием сжатия позволяет процессу гипсования распространяться вниз до глубин в сотни метров, что усугубляет неблагоприятную геодинамическую ситуацию<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> В настоящее время под давлением общественности и по итогам научной экспертизы Совет Министров СССР принял решение о перепрофилировании Крымской АЭС в учебный центр ядерной энергетики. Таким образом, изложенные выше факты и соображения не остались без внимания. Однако принятое решение представляется неоптимальным в социально-экономическом отношении. Крым - всесоюзная здравница, и профилирующей там должна быть пищевая и курортная индустрия. В такого рода предприятия, а частично, если возможно, и рекреационные объекты следует переоборудовать разнообразные сооружения АЭС и использовать ее территорию. Для учебного центра в стране нетрудно найти другое место.



Каждый из перечисленных факторов сам по себе может и не привести к катастрофе, но их сочетание опасно. Сильное землетрясение может активизировать грязевой вулканизм и реализовать избыточное давление сульфидсодержащих глинистых пород, а их совместное воздействие на конструкции АЭС будет усилено неблагоприятными грунтовыми условиями.

Итак, взаимосвязь геологических процессов, которые в отдельных местах сочетаются с неблагоприятным техногенным влиянием, может приводить к многократному усилению вредных воздействий землетрясения, отчего его разрушительные последствия могут достичь уровня природной катастрофы. Этот аспект оценки геологической опасности не получил до сих пор должного признания, насколько нам известно, не только в СССР, но и за рубежом. По-прежнему в практике изысканий и экспертиз преобладает подход, ориентированный на независимые оценки различных групп опасностей: сейсмической, гидрогеологической, инженерной, обвально-оползневой, размыва берегов, заиливания водохранилищ и т. д. Проводя изыскания для планирования строительства и землепользования, особенно когда речь идет о сооружениях, разрушение которых может иметь серьезные социально-экологические последствия, необходимо всесторонне учитывать взаимообусловленность современных геологических процессов в конкретных условиях природной среды. По существу, необходим системный анализ для оценки интегральной геологической опасности. Научно-технические изыскания и экспертизы для такой оценки должны выполняться совместно специалистами в разных областях геологии и смежных наук. Теоретическая и методическая разработка изложенного подхода должна стать одной из задач научных исследований, проводимых в рамках Международной декады борьбы за уменьшение опасности природных бедствий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Губин И. Е. Сейсмоструктурный метод сейсмического районирования. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950.
2. Аэрокосмическое изучение сейсмоопасных зон. М.: Наука, 1988.
3. Трифонов В. Г. Позднечетвертичный тектогенез. М.: Наука, 1983.
4. Wallace B. E. Notes on stream channels offset by San Andreas fault, southern Coast Ranges, California//Proc. of Conf. on Geol. Probl. of San Andreas Fault System. Stanford Univ. Publ., Geol. Sci. 1968. V. 11. P. 6-20.
5. Wallace R. E. Geometry and rates of change of fault generated range fronts, south central Nevada // Journ. Res. US Geol. Surv. 1978. V. 6. N. 5. P. 637-650.
6. Никонов А. А. Голоценовые и современные движения земной коры: геолого-геоморфологические и сейсмоструктурные вопросы. М.: Наука, 1977.
7. Трифонов В. Г. Особенности развития активных разломов//Геотектоника. 1985. № 2. С. 16-26.
8. Макаров В. И., Щукин Ю. К. Оценка активности скрытых разломов//Геотектоника. 1979. № 1. С. 96-109.
9. Карта активных разломов СССР и сопредельных территорий. Масштаб 1 : 8 000 000/Отв. ред. Трифонов В. Г. М.- Иркутск: ГУГК, 1987.