

В.Г.Трифонов
А.С.Караханян,
А.И.Кожурин

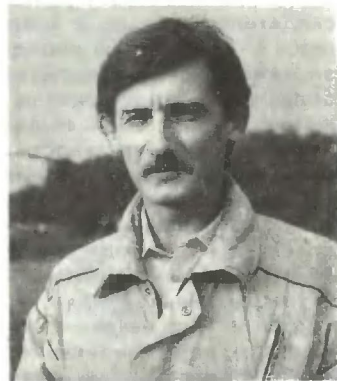
Активные разломы и сейсмичность



Владимир Георгиевич Трифонов, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией неотектоники и космической геологии Геологического института АН СССР, заместитель председателя Комиссии АН СССР по изучению природных ресурсов с помощью космических средств. Специалист по неотектонике и современной геодинамике активных областей. Неоднократно выступал в «Природе».



Аркадий Степанович Караханян, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией тектоники Института геологических наук АН АрмССР. Основные научные интересы связаны с проблемами сейсмотектоники и неотектоники Армении и изучением новейших глубинных структур Ближнего Востока и Закавказья с помощью космических снимков.



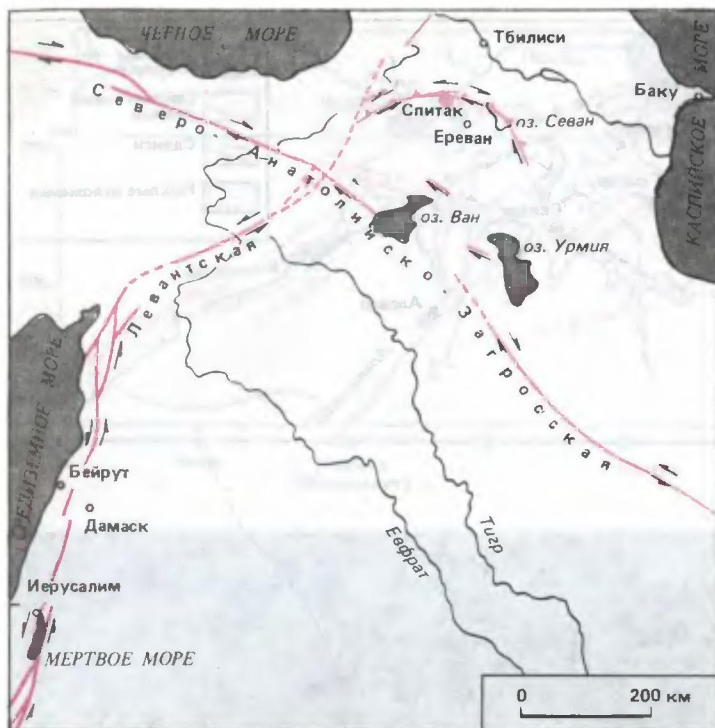
Андрей Иванович Кожурин, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института АН СССР. Занимается проблемами неотектоники. Один из авторов карты активных разломов СССР и сопредельных территорий.

СОВРЕМЕННАЯ тектоническая активность проявляется в разнообразных движениях земной коры. Они могут происходить плавно или импульсами, образовывать обширные и пологие изгибы поверхности или смещения блоков по разломам. Сильные землетрясения чаще всего связаны именно со смещениями, и Спитакское землетрясение — характерный тому пример. Попытаемся осмыслить связь сейсмичности с движениями коры, прибегнув к трем последовательным масштабным приближениям, т. е. рассматривая сначала весь Ближний Восток, затем более детально его североармянскую часть и, наконец, еще детально район самого землетрясения. Возможность такого «многоярусного» анализа дают космические снимки, аэрофотоснимки и наземные наблюдения.





ПЕРВОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ: КРУПНЕЙШИЕ АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ БЛИЖНЕГО ВОСТОКА

Если отвлечься от частных, активная тектоника Ближнего Востока определяется сочетанием двух пересекающихся крупнейших зон разломов. Одна из них, Северо-Анатолийско-Загросская, рассекает с запада на восток Турцию, возле оз. Ван изгибается и продолжается в юго-восточном направлении вдоль гор Загрос в Иране. Другая зона, Левантская, начинается от залива Акаба в Красном море, тянется на север через Израиль, Ливан и западную Сирию, а на юге Турции изгибается к северо-востоку, продолжаясь до верховий р. Куры. Здесь она прерывается, но через несколько десятков километров ее продолжает Казбек-Цхинвальский разлом, достигающий горы Казбек в Главном Кавказском хребте.

В обеих зонах происходили и проис-



Крупнейшие Северо-Анатолийско-Загросская и Левантская зоны активных разломов Ближнего Востока и Закавказья. Эпицентр Спитакского землетрясения располагается к югу от дуги активных разломов северной Армении, ответвляющейся от Левантской зоны. Движения по всем крупным активным разломам региона обеспечивают сближение Аравии и Кавказа и раздвигание Турции и Ирана.

-  Сдвиги
-  Взбросы и надвиги
-  Предполагаемые участки разломов
-  Эпицентр Спитакского землетрясения

ходят многочисленные землетрясения. Так, вдоль значительной части первой зоны в 1939—1944 гг. прокатилась волна сильных землетрясений, вызвавших суммарное смещение горных масс вдоль нее на 4 м по горизонтали и на 1 м по вертикали¹. В 1966 и 1976 гг. землетрясения с таким же направлением движений произошли на юго-восточных отрезках зоны. Известны землетрясения и в Левантской зоне. Им обязано, например, разрушение и смещение античного (или ранневизантийского) акведука возле сирийского селения Эль-Хафр. Обилие летописных свидетельств позволило определить средний интервал повторяемости землетрясений интенсивностью не менее 9 баллов в Левантской зоне: в районе г. Дамаска он составляет около 300 лет².

По обьему зонам смещения коры имели преимущественно характер сдвигов, т. е. происходили вдоль разломов в горизонтальном направлении. В Северо-Анатолийско-Загросской зоне сдвиги правые — крылья разломов

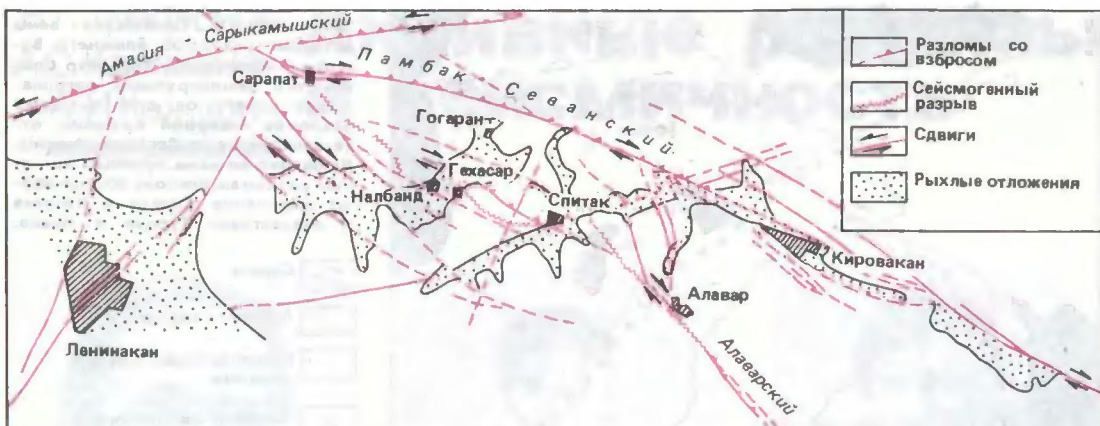
двигались по часовой стрелке (иначе говоря, если бы наблюдатель поставил ноги на разные стороны разлома, то его правая нога «поехала» бы назад, а левая — вперед). В Левантской зоне сдвиги левые, т. е. крылья разломов двигались против часовой стрелки. За многие тысячелетия части пересеченных разломами молодых форм рельефа сместились на сотни метров. В Левантской зоне удалось подсчитать среднюю скорость сдвиговых перемещений — она составила 5—7,5 мм/год. В Северо-Анатолийско-Загросской зоне скорость, вероятно, еще больше.

Таким образом, интенсивные движения по разломам в последние тысячелетия соответствуют здесь высокому уровню сейсмичности. Движения происходили вполне упорядоченно: взаимное расположение зон и направление сдвигов таково, что Аравия и Кавказ сближаются, а территории Анатолии и Ирана как бы раздвигаются (первая — на запад, вторая — на восток).

На севере Левантской зоны, в 50 км западнее турецкого г. Сарыкамыша, от нее отходят на восток крупные активные разломы северной Армении, образующие выпуклую на север дугу. Непосредственно к югу от нее и произошло Спитакское землетрясение 1988 г., связанное, таким образом,

¹ Подробнее см.: Трифонов В. Г. Позднечетвертичный тектогенез. М., 1983; Аэрокосмическое изучение сейсмоопасных зон. М., 1988.

² Karām El Hakeem. Analysis of the 1759 A. D. Damascus earthquake. Damascus, 1986.



Дуга активных разломов северной Армении. Она состоит из Амасия-Сарыкамышского и Памбак-Севанского разломов: вдоль первого долины и водоразделы сдвинуты влево, вдоль второго — вправо на сотни метров. У обоих разломов северные крылья подняты и немного надвинуты на южные, но эта взбросовая составляющая движений многократно уступает сдвиговой. Оба разлома оперяются с юга второстепенными активными разломами, один из которых активизировался в 1988 г. и проявился разрывом земной поверхности при Спитакском землетрясении.



Разрушенная церковь в селении Ширакмут.

Фото Н. М. Данилочкина.

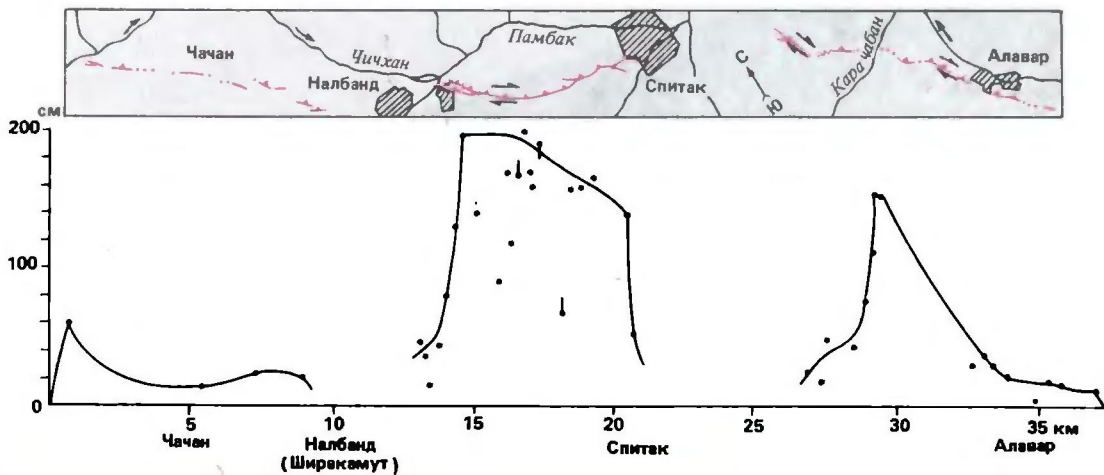
с крупнейшими активными разломами Ближнего Востока.

ВТОРОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ: АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ СЕВЕРНОЙ АРМЕНИИ

Более детальное рассмотрение упомянутой дуги показывает, что она состоит из двух разломов: Амасия-Сарыкамышского на западе и Памбак-Севанского на востоке, сочленяющихся под острым углом. Оба разлома круто наклонены на север, первый под углами $45-60^\circ$, второй — $70-80^\circ$, у обоих подняты северные крылья, но эта вертикальная составляющая движений, сопровождающаяся при наклоне разломов на север небольшим перекрытием крыльев (геологи называют такой тип смещения

взбросом), в несколько раз уступает одно-возрастной ей сдвиговой. По Амасия-Сарыкамышскому разлому происходили левые сдвиги, а по Памбак-Севанскому — правые. Таким образом, эти разломы играют ту же роль, что и рассмотренные выше главные зоны разломов Ближнего Востока: обеспечивают сближение южных частей территории с северными.

Величины как сдвиговых, так и вертикальных смещений зависят от возраста смещаемых форм рельефа. У самых молодых долин и водоразделов величина сдвигов достигает метров, у тех, которым десятки тысяч лет — сотен метров, поскольку их смещения происходили неоднократно. Наиболее интересные сведения получены нами о смещениях двух речных террас в западной части



Разрыв, возникший на земной поверхности при Спитакском землетрясении 1988 г. [вверху] и общее смещение вдоль его длины [внизу].

Остатки крепости VII в. Лори-Берд, пережившей многие землетрясения. При Спитакском землетрясении она оказалась в 8-балльной зоне и испытала незначительные повреждения.

Фото А. А. Никонова.

Памбак-Севанского разлома возле селений Сарапат и Гогаран, поскольку палеонтологические и геоморфологические данные позволили довольно точно определить их возраст (верхней — примерно 70 тыс. лет, нижней — 20—25 тыс. лет)³. Верхняя терраса смещена по разлому вправо на 300 м, а нижняя — на 80—120 м. Отсюда была вычислена средняя скорость сдвига, превосходящая 5 мм/год. Она почти не уступает скорости перемещений в Левантской зоне разломов, что может свидетельствовать и о столь же высокой сейсмической опасности.

³ Мкртчян К. А. К характеристике послевюрмских тектонических движений бассейна р. Памбак // Вопр. геологии и гидрогеологии Армянской ССР. Ереван, 1956. С. 65—73.

Землетрясения последних лет сопровождалась дальнейшими подвижками по обоим разломам. Так, при землетрясении с магнитудой 6,9, которое произошло в юго-западной части Амасия-Сарыкамышского разлома 30 октября 1983 г., имели место левый сдвиг на 1 м и поднятие северо-западного крыла разлома до 80 см. При Спитакском землетрясении 7 декабря 1988 г. на участке Памбак-Севанского разлома, ближайшем к очагу, возникла 200-метровая трещина с правым сдвигом стенок на 3 см и поднятием северного крыла до 6 см.

Спитакское землетрясение произошло, однако, не непосредственно на Памбак-Севанском разломе, а южнее него. Здесь выделяется целая система второстепенных активных нарушений, «оперяющих» Памбак-



Уступ разлома в зоне максимального взброса на участке между Спитаком и с. Гехасар.

Фото Дж. Боммера.

Севанский и Амасия-Сарыкамышский разломы, причем к югу от первого они простираются на северо-запад, а к югу от второго — на северо-восток. С последними могли быть связаны сильные Ленинанканские землетрясения 1926 г. При Спитакском землетрясении 1988 г. возник 37-километровый разрыв земной поверхности, который с перерывами протягивается от с. Алавар до р. Чичхан. Этот разрыв находится в зоне влияния Памбак-Севанского разлома и занимает относительно него то же положение, что и другие оперяющие его нарушения северо-западного простираения. Мы подробно обследовали его в мае 1989 г., а предварительные наблюдения А. С. Караханян провел еще зимой 1988 г., сразу после землетрясения.

ТРЕТЬЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ: РАЗРЫВ ПРИ СПИТАКСКОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

Разрыв состоит из трех участков, разделенных двумя большими промежутками — юго-восточнее Спитака и в окрестностях пос. Ширакамут (Налбанд). Оба перерыва при-

ходятся в основном на впадины, заполненные рыхлыми наносами, которые затрудняют выход сейсмогенных трещин на поверхность. На всех трех участках смещения при землетрясении имели как взбросовую (с поднятием северо-восточного крыла), так и правосдвиговую составляющие. Их соотношения изменчивы. Так, в 1 км юго-восточнее с. Гехасар взброс не превышает 80 см, а правый сдвиг достигает 180 см. В 2,5 км юго-восточнее практически все смещение на 170 см оказывается взбросовым.

Мы проанализировали, как зависит отношение взбросовой и сдвиговой составляющих от ориентации того или иного отрезка разрыва. Обнаружилось, что на отрезках северо-западного и север-северо-западного простираений (направления 315—340°) чаще преобладает сдвиговая компонента, а на отрезках запад-северо-западного простираения (310—270°) все большую роль приобретает взбросовая. Это означает, что различные формы смещений на отрезках разных простираений обусловлены единым перемещением горных масс, при котором северная и южная части Кавказа сближаются и территория «укорачивается» в меридиональном направлении. Иначе говоря, подвижка при землетрясении стала следствием той же



Сейсмогенный оползень в среднем течении р. Чичхан.
Фото Л. Н. Рыбкова.

тенденции, которая проявилась за последние десятки тысяч лет в смещениях по всем крупным активным разломам Закавказья и Ближнего Востока.

Суммарное смещение на каждом отрезке разлома определялось векторным сложением взбросовой и сдвиговой составляющих. Оно оказалось наибольшим на центральном участке (170—200 см). Вероятно, здесь разлом в очаге землетрясения 1988 г. непосредственно вышел на земную поверхность, тогда как на периферических участках лишь косвенно отразились его продолжения на глубине. Если так, то, продолжая центральный участок от поверхности на глубину (а он наклонен на северо-восток под углом около 60°), можно определить положение гипоцентра главного толчка. Скорее всего, гипоцентр располагается посередине афтершокового роя, т. е. на глубине 10—12 км. Следовательно, гипоцентр и его проекция на поверхность (эпицентр) находятся восточнее с. Гогаран — примерно там, где их положение определяется и по данным удаленных сейсмических станций.

Если не на всем, то на значительном протяжении разрыв 1988 г. возник на месте ранее существовавшего разлома. На его юго-восточном участке обнаружены правосдвиговые смещения в долинах р. Карачобан и двух других левых притоков р. Лернаджур на десятки метров и совсем молодого оврага — на 8—9 м. Севернее с. Гехасар у шоссе Спитак — Ленинакан по северо-восточной ветви разрыва почвенный слой взброшен на 30 см, а нижележащий пласт вулканического туфа возрастом около 70 тыс. лет смещен в том же направлении на 120 см, т. е. он испытал до 1988 г. еще одну или даже несколько подобных подвижек. Более того, эта и другие ветви разрыва совпадают с зоной интенсивных деформаций туфа и соседних слоев: они наклонены на юго-запад под углами до 28° , тогда как в других местах залегают почти горизонтально.

Итак, при Спитакском землетрясении 1988 г. произошла подвижка по одному из второстепенных разломов, оперяющих Памбак-Севанский разлом, который, в свою очередь, связан с крупнейшими разломами Ближнего Востока в единую систему. Подвижка при землетрясении была очередным шагом в направленном движении горных масс региона, обуславливающим сближение Аравии и Кавказа и раздвигание Анатолии и Ирана. А если случившееся закономерно, то мы вправе, опираясь на известную геологическую обстановку этого и других сильных землетрясений, попытаться решить обратную задачу: обнаружив признаки подобной обстановки, оценить опасность сильных землетрясений в том или ином регионе.

АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ КАК КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Метод использования геологических критериев, и прежде всего данных об активных разломах, для оценки сейсмичности можно представить как последовательное решение трех групп задач, соответствующее трем стадиям работ⁴. На первой выделяются и исследуются новейшие геологические структуры, возникшие в последние 10—30 млн лет. Не все области концентрации деформаций и смещений этого времени сохранили активность до сих пор. Поэтому определяются тенденции развития: ускорение или замедление движений в том или

⁴ Подробнее см.: Трифонов В. Г. Активные разломы и сейсмичность // Современная тектоническая активность территории СССР. М., 1984. С. 24—34; Аэрокосмическое изучение сейсмоопасных зон. М., 1988.

ином тектоническом элементе, перестройка структуры (появление нового разлома на месте старого) и т. п. Это позволяет выбрать потенциальноопасные области.

На второй стадии в выбранных областях определяются, изучаются и картируются разломы и другие структуры, активные в последние тысячи и десятки тысяч лет. Именно к ним приурочено подавляющее большинство известных сильных землетрясений. Для оценки сейсмической опасности важно знать размеры и морфологию активных структур, величины и скорости недавних движений. Но не все активные зоны, даже сходные по этим параметрам, одинаково потенциально опасны сильными землетрясениями, поскольку движения в таких зонах могут происходить как в виде редких, но сильных сейсмических импульсов, так и более плавно, сопровождаясь лишь слабыми толчками. Поэтому необходима третья стадия работ — оценка возможностей сильных землетрясений в активной зоне двумя путями.

Если предполагать, что сильные землетрясения возникнут там, где они происходили (а нам это предположение кажется справедливым), то первый путь — это поиски следов прошлых землетрясений, оценка их интенсивности и средней повторяемости. В. П. Солоненко, Н. А. Флоренсов, В. К. Кучай, А. А. Никонев, В. С. Хромовских и ряд других советских сейсмогеологов убедительно показали возможность выявления сейсмодислокаций, созданных на земной поверхности нарушениями гравитационного равновесия и действием ударной волны при сильном землетрясении. Американцы Р. Е. Уоллес и К. Си предложили другой способ поиска следов прошлых землетрясений. Он основан на выявлении дискретности смещений по активным разломам, свидетельствующей об импульсном характере подвижек, и на определении возраста этих импульсов. Развивая этот способ, нам удалось показать, что в зонах таких разломов, как Хангайский и Кобдинский в Монголии или Таласо-Ферганский на Тянь-Шане, землетрясения с магнитудами не менее 7,5 повторяются через 600—800 лет; их эпицентральные области захватывают отрезки разломов протяженностью в сотни километров.

Другой путь выделения активных зон и их участков, где вероятны сильные землетрясения, предусматривает оценку физической предпосылки сильного землетрясения — возможности высокой концентрации тектонических напряжений в значительном объеме горных пород. Для этого прежде всего необходимо изучить прочность горных пород в приразломной зоне и степень их

раздробленности. Прочные массивы пород более способны концентрировать напряжения, а значит, и генерировать сильные землетрясения. Для относительно неглубоких потенциальных очагов землетрясений состав и залегание пород, определяющие прочность в массиве, как и степень их раздробленности, можно оценить с помощью геологического картирования. Современная раздробленность проявляется и в морфологии активных разломов: более компактные зоны (где подвижки происходят вдоль одной линии) представляют большую опасность, чем зоны, где активные нарушения рассеяны на большой площади.

Для более глубоких коровых очагов важно знать, как ведет себя активный разлом на глубине. Если он насквозь пронизывает значительную толщу и выходит на поверхность, вероятность концентрации напряжений в его зоне ниже, чем у разлома, скрытого на глубине и перекрытого недеформированным слоем или слоем с иным характером нарушений. В последнем случае напряжения концентрируются на границах между активными структурами разных слоев, происходит срыв и скопление одного слоя по другому, что само по себе может быть источником сильного землетрясения. Однако наибольшую сейсмическую опасность, как показали Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг., представляют сочленения разломов разных направлений, активных в разных слоях земной коры⁵. Комплексный анализ разнообразных факторов, способствующих концентрации напряжений, помогает оценить вероятность возникновения сильного землетрясения в исследуемой части активной зоны.

Мы далеки от мысли предлагать использовать для сейсмического районирования и оценки опасности возникновения землетрясений только геологические критерии, но всесторонне и широко учитывать их необходимо. И дело не только в отсталости нашей сейсмической аппаратуры, а прежде всего в оперативности и относительной дешевизне геологических методов. Даже в такой технически оснащенной стране, как США, еще в 60—70-е годы было выполнено детальное геологическое изучение и картирование активных разломов сейсмичной Калифорнии. Это позволило рационально размещать строительные объекты, в особенности экологически опасные.

⁵ Макаров В. И., Щукин Ю. К. // Геотектоника. 1979. № 1. С. 96—109.