#### СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ТРИФОНОВ В.Г., БАЧМАНОВ Д.М. Геологический институт РАН, г. Москва, vgtrifonov@mail.r. ИВАНОВА Т.П. Институт динамики геосфер РАН, г. Москва ИМАЕВ В.С. Институт земной коры СО РАН. г. Иркутск

TRIFONOV V.G., BACHMANOV D.M. Geological institute of the RAS, Moscow IVANOVA T.P. Institute of geospheres dynamics of the RAS, Moscow IMAEV V.S. Institute of the earth crust of the SB RAS, Irkutsk

## ПРИНЦИПЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ (НА ПРИМЕРАХ СИРИИ И ФЕННОСКАНДИИ) PRINCIPLES AND TECHNOLOGY OF USING GEOLOGICAL DATA TO ASSESS THE SEISMIC HAZARD (BY THE EXAMPLES OF SYRIA AND FENNOSCANDIA)

**Ключевые слова:** сейсмическая опасность; активные разломы; упругая деформация; Сирия; Фенноскандия.

Аннотация: на примерах Сирии и Фенноскандии в статье изложены принципы и показана технология использования геологических данных (о неотектонике, активных разломах, архео- и палеосейсмичности) для оценки сейсмической опасности территории. Обсуждаются дискуссионные аспекты использования геологических данных и пути их решения для создания карт общего сейсмического районирования России OCP-2012. К числу таких аспектов относится учет морфокинематических особенностей активных разломов, интенсивности перемещений по ним и вариаций скорости накопления упругих деформаций в сейсмогенерирующей зоне в реальном масштабе времени. **Key words:** seismic hazard; active faults; elastic deformation; Syria; Fennoscandia.

**Abstract:** the article considers the principles and technology of using geological data (neotectonics, active faulting, archaeo- and paleoseismicity) to assess the seismic hazard of a territory. Some debatable aspects of using geological data and ways of their solutions to create the maps of general seismic zoning of Russia OSR-2012 are discussed. They include taking into consideration morphokinematic features of active faults, intensity of movements on the faults and variations of accumulation rate of elastic strains in the seismogenic zone in real time. Введение

18 лет, прошедших после составления первой карты общего сейсмического районирования СССР [3], обнаружили значительные ошибки, допущенные при ее составлении. Вероятно, главным источником этих ошибок было недостаточное использование геологических данных, и прежде всего данных об активных разломах для оценки сейсмической опасности. Указанный недостаток был в значительной мере исправлен при составлении комплекта карт общего сейсмического районирования России ОСР-97 [10], хотя ряд проблем использования геологических данных при ОСР тогда остался нерешенным. Принципы и технологическая



Рис. 1. Технологическая схема оценки сейсмической опасности по комплексу геологических и сейсмологических данных



Рис. 2. Упрощенная неотектоническая карта Сирии: 1–6 — базальты: 1 — голоцен, 2 — верхний плейстоцен, 3 — средний и нижний плейстоцен, 4 — плиоцен, 5 — верхний миоцен (с нижним плиоценом на плато Шин), 6 — средний и нижний миоцен, редко олигоцен; 7 — поднятия выше 600 м; 8 — впадины; 9 — позднекайнозойские разломы; структурные элементы: АF — разлом Аманос (Восточно-Анатолийская зона); AP — Алеппское плато; EG — сегмент Эль-Габ Трансформы Мертвого моря (DST); GS — Галилейское море, впадина pull-apart; JA — нагорье Джебель-Араб; PA — Пальмириды; RF — продолжение южной части DST разломо Роум и далее вдоль континентального склона; SP — плато Шин; УD — депрессия Йизреел; YF — сегмент Яммуне DST. Составители: B.Г. Трифонов, А.Е. Додонов, Д.М. Бачманов, Т.П. Иванова, М. Рукие, О. Аммар, Х. Минини, А.-М. Аль-Кафри, О. Али, Т. Заза и А. Юсеф (в Генеральной организации дистанционного зондирования Сирию (GORS), Дамаск, 2009 г.)



Рис. 3. Карта изосейст землетрясения 29.06.1170 г. в Западной Сирии. Для сравнения приведена изосейста I = 8 землетрясения 20.05.1202 г. в Ливане по данным [12]

схема комплексного использования сейсмологических и геологических данных (рис. 1), которые предлагается применять при создании нового комплекта карт общего сейсмического районирования России ОСР-2012, ниже рассмотрены на примере оценки сейсмической опасности (сейсмического районирования в масштабе 1:1000000) Сирии. Обсуждаются проблемы, возникающие при использовании этой технологии для ОСР-2012.

# Принципы и технология оценки сейсмической опасности Сирии

Выполненные при ведущем участии авторов неотектонические исследования Сирии позволили выявить, параметризовать и закартировать в масштабе 1:1000000 основные структурные элементы региона и обосновать стадийность их формирования с конца олигоцена, то есть за последние 26 млн лет (рис. 2). Изучение неотектонической эволюции региона важно в рассматриваемом аспекте, поскольку оно дало возможность обособить разломы и связанные с ними структуры, возникшие или продолжавшие развиваться в последнюю стадию (последние 4–3,5 млн лет) и сохраняющие подвижность до сих пор, проявляясь в виде активных и возможно активных разломов [21].

Активными называют разломы, сейсмогенерирующие подвижки по которым происходят сейчас и потому могут ожидаться в будущем. Поскольку движения по разломам осуществляются неравномерно и часто дискретно (сейсмическими импульсами), понятие «сейчас» включает в себя достаточно продолжительный интервал времени, в течение которого проявляются закономерности повторяемости подвижек. В мировой инженерно-изыскательской практике таким интервалом обычно считают либо голоцен (последние 10 тыс. лет) [11], либо поздний плейстоцен-голоцен (последние ~100 тыс. лет) [25]. Авторами принято второе определение.

Изучение активных разломов, включающее в себя анализ детальных космических изображений и трехмерной модели рельефа, полевые наблюдения и лабораторное определение возраста смещений радиоуглеродным, уран-ториевым, калий-аргоновым, аргон-аргоновым, палеомагнитным, археологическим и геолого-корреляционным методами, позволило закартировать эти разломы и охарактеризовать их по таким параметрам, как: длина сегментов, кинематический тип, величина и возраст смещений, интенсивность (средняя скорость) позднечетвертичных движений. Местами удалось выделить сейсмогенные полвижки, относяшиеся к одному или нескольким сильным землетрясениям. Были установлены также другие проявления четвертичной активности — деформации террас и поверхностей выравнивания, вулканические проявления, которые помогли уточнить параметры активных разломов или выявить площадные активные структуры.

Использованные сейсмологические данные включали в себя: региональную выборку из мирового каталога инструментальных землетрясений и каталога исторических землетрясений, составленного на основе опубликованных работ и дополненного нами с учетом результатов архео- и палеосейсмологических исследований. Из-за ранней письменной регистрации сейсмичности и обилия археологических памятников исторического времени данные исторических документов и большинство археологических и геологических свидетельств землетрясений относятся к одному и тому же временному интервалу и дополняют друг друга. Их совместный анализ позволил построить карты изосейст ряда сильнейших землетрясений прошлого (рис. 3), что было использовано как для уточнения геометрии и параметров зон возникновения очагов землетрясений (BO3), так и для оценки распределения интенсивности сотрясений.

Активные разломы, другие проявления четвертичной тектонической активности и эпицентры землетрясений представлены на карте современной геодинамики Сирии и сопредельных областей масштаба 1:1 000 000 (рис. 4). На основе совместного анализа зон активных разломов, кластеров эпицентров землетрясений и рисунка плейстосейстовых областей сильнейших исторических землетрясений были выделены и закартированы главные источники возможных будущих землетрясений — линейные зоны ВОЗ. Их сейсмический потенциал (М<sub>мах</sub> и, при наличии достаточных исходных данных, повторяемость сильнейших событий) оценивался путем сопоставления сейсмологических данных и параметров активных разломов. Инструментальные землетрясения с магнитудами M<sub>s</sub> > 6 крайне редки и непредставительны для зон ВОЗ рассматриваемой территории. Поэтому главным источником сейсмологической информации были исторические землетрясения. Для оценки сейсмического потенциала активных разломов использовалась длина их сегментов, выделенных по геологическим признакам, а там, где позволяли исходные данные, также величины подвижек при отдельных землетрясениях с учетом кинематического типа разломов [26].

На основе закартированных и параметризованных зон ВОЗ и оценки параметров затухания сотрясаемости при сильнейших исторических землетрясениях построена карта распределения интенсивности сотрясений на территории Сирии в баллах шкалы MSK (карта сейсмического районирования страны) масштаба 1:1 000 000 (рис. 5).

### Проблемы использования геологических данных для оценки параметров зон ВОЗ

Ниже обсуждаются аспекты использования геологических данных, и прежде всего данных об активных разломах для параметризации зон ВОЗ. Эти аспекты учитывались недостаточно или не учитывались совсем при составлении комплекта карт ОСР-97 [9], но они представляются важными для параметризации зон ВОЗ в рамках работ по составлению комплекта карт общего сейсмического районирования России ОСР-2012. Результаты охарактеризованных выше сирийских работ позволили пролить на них новый свет.

При составлении карт ОСР-97 учитывались местоположение и длина зон активных разломов (местоположение для картирования зон ВОЗ и длина Lдля расчета возможной  $M_{max}$ ). Расчет М<sub>тах</sub> проводился с помощью эмпирических формул [26] или специальных палеток [23]. Поскольку разлом (или его сегмент) лишь в редких случаях активизируется на всем протяжении, такая оценка представляет собой верхний предел возможной М<sub>тах</sub>.

Подобные расчеты М<sub>тах</sub> будут выполняться и при работах над ОСР-2012. Но требует уточнения подход к сегментации активных разломов. Вопервых, если зона ВОЗ включает в себя несколько сегментов активных разломов, расчет М<sub>тах</sub> должен производиться по длине сегментов, а не зоны ВОЗ. Вовторых, в понятие «сегмент разлома» вкладывают разный геологический смысл. Выделяются сегменты крупных разломных зон, отличающиеся строением, геологической историей и современной геодинамикой. Такова, например, Трансформа Мертвого моря (DST) на восточном побережье Средиземного моря, в которой различаются с юга на север сегменты: залива Акаба, вади Араба, Мертвого моря, долины Иордана, Яммуне в Ливане и Эль-Габ в Сирии и на юге Турции и др. (см. рис. 4).



Рис. 4. Упрощенная карта современной геодинамики Сирии и соседних территорий: 1–8 — активные разломы: 1 — главные (скорости движений V>1 мм/год); 2 — второстепенные (V<1 мм/год); 3 — возможные активные разломы; 4 — предполагаемые продолжения активных и возможных активных разломов; 5 — сдвиг; 6 — сброс; 7 — взброс или надвиг; 8 — раздвиг; 9–12 — эпицентры землетрясений: 9 — инструментальных с M = 4,5–5,4; 10 — инструментальных с M = 5,5–6,8; 11 — исторических с M = 5,7–6,9; 12 — исторических с M = 7,0–7,8; 13–15 — четвертичные базальты: 13 — ранний и средний плейстоцен; 14 — поздний плейстоцен; 15 — голоцен; 16–19 — структурные элементы: 16 — высокие поднятия; 17 — средние поднятия; 18 — оси антиклиналей; 19 — впадины. Составители: В.Г. Трифонов, Д.М. Бачманов, А.Е. Додонов, Т.П. Иванова, А.С. Караханян, 0. Алмар, А.-М. Аль-Кафри, Х. Минини, О. Али, М. Али и Т. Заза (в GORS, Дамаск, 2009 г.)

Вместе с тем в пределах сегмента Эль-Габ находятся отдельные сейсмогенные разломы с разными морфокинематическими характеристиками. Наконец, каждый из этих разломов состоит на поверхности из отдельных сложно сочетающихся нарушений, которые на глубине могут сливаться в единую зону. Очевидно, нарушения последнего типа не могут приниматься в расчет как индивидуальные сейсмогенерирующие разломы. Что же касается сегментов разломных зон или обособленных крупных разломов внутри таких сегментов, то выбор, что из них использовать для определения М<sub>тах</sub> по корреляционному соотношению М<sub>тах</sub>/L, должен производиться в каждом конкретном случае индивидуально на основе геологических соотношений. При оценке сейсмической опасности Сирии мы учитывали длину индивидуальных разломов.

При ОСР-97 интенсивность перемещений по разлому и степень его выраженности принимались в расчет лишь на качественном уровне. Однако оценка сейсмического потенциала активных разломов, как показали выполненные исследования, зависит от интенсивности (скорости) позднечетвертичных движений и их распределения по длине разлома, а также от его кинематического типа и величины индивидуальных сейсмогенных подвижек. Рассмотрим возможности их учета.

Зависимость магнитуд землетрясений от кинематического типа разлома

(взбросо-надвиг, сброс или сдвиг) показана в работах [1, 3, 4, 6], но отсутствие представительной статистики заставляет при оценке  $M_{max}$  ограничиться более упрощенным разделением, обоснованным в работе [26]. Там же показаны соотношения магнитуд с величинами подвижек при землетрясениях. Очевидно, их надо использовать при оценке сейсмического потенциала активных зон, когда для этого имеются необходимые палеосейсмологические данные.

К учету скорости перемещений по активным разломам предлагается подойти следующим образом. Прежде всего, можно предположительно оценить повторяемость сильнейших землетрясений в зоне активного разлома,



Рис. 5. Карта сейсмической зональности Сирии в баллах шкалы МSK. Составители В.С. Имаев и Л.П. Имаева

исходя из скорости перемещений по нему и величины индивидуальных подвижек, которые возможны при рассчитанной для данного разлома M<sub>max</sub>. Кроме того, корреляционные соотношения M<sub>max</sub>/L даются в работе [27] с допущениями определенных отклонений в сторону как увеличения, так и уменьшения среднестатистических оценок. Предлагается (в порядке обсуждения) использовать эту вариабельность и принять положительные отклонения для разломов с большими скоростями перемещений (V>1 мм/год) и отрицательные — для разломов с меньшими скоростями (V<1 мм/год), не выходя за рамки допущенных отклонений.

Наибольшие сложности возникают при оценке сейсмического потенциала возможных активных разломов, по которым позднечетвертичные смещения выражены нечетко и фрагментарно при наличии достоверных более древних смещений, а выделить участки позднечетвертичных смещений в отдельные сегменты не позволяет имеющийся материал. Примерами таких разломов служат в Сирии разлом Олаб и зона Латакия-Аафрин, а на территории России и ее обрамлении — некоторые нарушения Кавказа и Центрально-Устюртский разлом в Западном Казахстане. При проведении ОСР-97 такие разломы либо учитывались как достоверно активные, либо не принимались в расчет. В работах по ОСР-2012 предлагается учитывать эти разломы, но, оценивая их сейсмический потенциал по длине геологически выделяемых сегментов, вносить в соотношения М<sub>тах</sub>/L поправочный коэффициент (например, равный 0,5) на основе регионального сейсмологического опыта.

В общем, в работах по выделению и параметризации зон ВОЗ при создании ОСР-2012 предлагается отказаться от стремления использовать только те параметры активных разломов, которые могут быть установлены повсеместно, поскольку это неминуемо приводит к ограничению числа используемых признаков и тем самым уменьшает обоснованность оценки М<sub>тах</sub> и повторяемости землетрясений. Предлагается в конкретных случаях использовать весь возможный набор характеристик, даже если у других активных разломов некоторые из них неизвестны.

В заключение обратимся еще к одному аспекту оценки сейсмической опасности по комплексу сейсмологических и геологических данных. Все карты общего и детального сейсмического районирования и в России, и за рубежом до сих пор основывались на общем принципе — если в зоне ВОЗ или (при других подходах) в зоне сейсмоактивного разлома (или разломов) зарегистрировано максимальное землетрясение определенной магнитуды (неважно, инструментальное, историческое или установленное методами архео- или палеосейсмичности), то магнитуда ожидаемого в будущем максимального сейсмического события принимается (с разной вероятностью для разных отрезков времени) не ниже, чем для этого события. Соотношения магнитуд и повторяемости землетрясений принимаются при этом неизменными для всего учитываемого в расчетах интервала времени (до тысяч или десятков тысяч лет). При таком «консервативном» подходе игнорировались возможные временные изменения напряженно-деформированного состояния зон ВОЗ. Рассмотрим важность учета таких изменений на примере южной и центральной частей сегмента Эль-Габ DST в Западной Сирии. Северная часть того же сегмента исключена из рассмотрения, поскольку находится в непосредственной близости к Восточно-Анатолийской зоне разломов и порой трудно определить, к какой из этих зон





Рис. 6. Гистограмма временного распределения столетней сейсмической энергии, выделенной землетрясениями с магнитудами M<sub>s</sub>>6 в зоне разлома Эль-Габ с I в. до н.э. (составитель В.Г. Трифонов): темные — южный и центральный участки; серый северный участок

следует отнести то или иное сейсмическое событие.

20 землетрясений с магнитудами M<sub>s</sub> > 6 было зафиксировано в южной и центральной частях зоны сегмента Эль-Габ за последние 2100 лет [7, 21]. Во временном распределении выделенной ими сейсмической энергии установлены элементы цикличности с интервалом повторяемости 300-400 лет, что, подобно проявлениям сейсмического цикла в других регионах, можно объяснить периодичностью сброса накопленной упругой энергии (рис. 5). Вместе с тем обнаружилось, что общее количество выделенной энергии было невелико до середины I тысячелетия н.э., затем стало возрастать и достигло максимума в XII веке, после чего начало спадать до современного минимального уровня, причем большинство сильных землетрясений последних 600 лет (после первой декады XV века) сместилось в северную часть сегмента Эль-Габ.

Продолжительному современному сейсмическому затишью на юге и в центре Эль-Габа можно предложить два противоположных объяснения: (1) это затишье является предвестником предстоящего в недалеком будущем сверхсильного землетрясения [15]; (2) это затишье отражает падение уровня сейсмической активности в рассматриваемой зоне, и магнитуда сильного землетрясения, которое можно ожидать в недалеком будущем в соответствии с сейсмической цикличностью, скорее всего не превысит  $M_s = 6,5$  и, во всяком случае, не достигнет  $M_s =$ 7,7 землетрясения 1170 г. Второй сценарий становится более правдоподобным, если сделать вполне резонное предположение, что количество выделенной сейсмической энергии варьировалось пропорционально скорости накопления упругой деформации в зоне разлома.

Упругая деформация, накапливающаяся продолжительное время в зоне разлома, реализуется смещениями и остаточными деформациями в зоне разлома. Сегмент Эль-Габ возник в плиоцене 4-3,5 млн лет назад [20]. Суммарное левосдвиговое смещение, произошедшее с этого времени, оценивается в 16-20 км. Оно было определено двумя способами: (1) по смещению вулканических структур на юге сегмента, в вулканической области Шин, возникшей 4-6,3 млн лет назад [13] и (2) по смещению зоны разломов Латакия-Аафрин на севере сегмента [20].

Приведенные величины позволяют оценить долговременную среднюю скорость сдвига в 5+1 мм/год. Средняя скорость голоценового сдвига определена суммированием молодых смещений по отдельным ветвям южной части сегмента Эль-Габ [8]. Она также составила ~5 мм/год. Иначе говоря, установленная средняя скорость характерна и для того интервала времени, по которому мы судим о современной активности разлома.

Однако три серии GPS-измерений, выполненных вокруг южной и центральной частей Эль-Габа независимо друг от друга российско-сирийской рабочей группой (в 2004-2008 гг.) и американо-сирийской рабочей группой (в 2000, 2007 и 2008 гг.), показали накопление упругой деформации, соответствующее скорости сдвига ~2-3 мм/год [10, 24]. Вместе с тем римский акведук, построенный поперек зоны Эль-Габ в I веке до н.э. — I веке н.э. (не ранее 63 года до н.э.), смещен по этому разлому влево на 12 м, что дает среднюю скорость сдвига за последние два тысячелетия ~6 мм/год [15, 20, 22]. Если допустить, что современная скорость накопления деформации характеризовала последние несколько столетий, в предыдущие столетия она была больше 6 мм/год. Иначе говоря, выявленные максимальные магнитуды землетрясений в течение последних двух тысячелетий действительно могли варьировать в зависимости от изменения скорости накопления упругой деформации. Это делает более вероятным второе объяснение современного спада сейсмической активности зоны Эль-Габ, согласно которому магнитуда ожидаемого в недалеком будущем сильного землетрясения едва ли превысит  $M_s = 6,5$ .

С тектонофизической точки зрения всякое тектоническое землетрясение означает превышение действующими напряжениями предела прочности горных пород. Сила (магнитуда) землетрясения зависит от объема пород, в котором этот предел достигается и снимаются накопленные напряжения (упругая деформация). В нашем случае это объем пород приразломной зоны. Поскольку все землетрясения происходили в земной коре на близких глубинах, такой объем определялся длиной активизированной части зоны сегмента Эль-Габ, которая на пике возрастания скорости накопления упругой деформации (землетрясение 1170 г., М<sub>s</sub> = 7,7) (см. рис. 3) сравнялась с полной длиной сегмента (~230 км), а при других землетрясениях была меньше.

Необходимость учета скорости накопления деформации при работах по ОСР-2012 становится очевидной при оценке сейсмического потенциала Фенноскандии. В ее северо-западной и северной частях, на территории Норвегии, Северной Швеции, Северной Финляндии и Кольского полуострова, выделяется система активных разломов [2, 5]. Там же были зафиксированы следы сильных палеоземлетрясений. Однако и наиболее интенсивные перемещения по разломам, и сильнейшие землетрясения с M<sub>s</sub>>7 происходили ~9,5-8 тыс. лет назад, а затем геодинамическая активность резко упала [14, 16–19]. Эта особенность связана с тем, что в указанную эпоху на стресс, направленный нормально к соседним частям срединно-океанического хребта, наложились напряжения, связанные с гляциоизостатическим поднятием Фенноскандии в результате снятия ледовой нагрузки. Поскольку интенсивность проявлений гляциоизостазии позднее прогрессивно уменьшалась, едва ли сейчас можно ожидать сейсмических событий на Кольском полуострове, магнитуда которых существенно превышала бы M<sub>s</sub> = 5,5 землетрясения 1926 года, а на северо-западе Фенноскандии — M<sub>s</sub> = 5,8-6,2 землетрясения 1819 года.

Таким образом, при оценке сейсмической опасности необходимо учитывать изменения скорости накопления упругой деформации (особенно для недалекого будущего).

#### Заключение

В статье изложены принципы и предложена технологическая схема комплексного использования сейсмологических и неотектонических данных для оценки сейсмической опасности территории. Среди неотектонических данных важнейшими признаны расположение и параметры активных разломов и других проявлений позднечетвертичных тектонических движений. На представленных оригинальных материалах показано применение этой технологической схемы для сейсмического районирования территории Сирии в масштабе 1:1000000.

Принципиально ту же технологическую схему предлагается использовать для создания нового комплекта карт общего сейсмического районирования России ОСР-2012. При этом следует учитывать ряд параметров сейсмически активных зон, которые не использовались или использовались не вполне корректно при составлении ОСР-97. Некоторые из таких дополнений (принципы сегментации активных зон разломов, необходимость учета кинематического типа разлома и индивидуальных сейсмогенных подвижек, учет скорости перемещений по активной зоне для оценки повторяемости сильнейших землетрясений) представляются нам достаточно очевидными. Другие дополнения предлагаются в порядке обсуждения. К ним относятся варьирование оценками М<sub>тах</sub> в зависимости от скорости перемещений по разлому и поправки к оценкам М<sub>тах</sub> для возможно активных разломов.

Важным предметом обсуждения является также возможное изменение активности сейсмогенерирующей зоны разломов со временем в зависимости от изменения скорости накопления упругой деформации. Возможность таких изменений прежде не учитывалась при оценке сейсмической опасности. Их реальность продемонстрирована в статье данными об активности сегмента Эль-Габ Трансформы Мертвого моря и поведении активных разломов Фенноскандии. Представляется, что изменения скорости накопления упругой деформации необходимо учитывать при оценке сейсмической опасности, особенно для недалекого будущего. 🗞

### Список литературы

- Ваков А.В. Геометрические параметры очагов и магнитуды землетрясений с разными типами движений // Вопросы инженерной сейсмологии. 1992. Вып. 33. С. 40–53.
- Никонов А.А. Голоценовые и современные движения земной коры: Геологогеоморфологические и сейсмотектонические вопросы. М.: Наука, 1977. 240 с.
- Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, 1977. 2.
- 4. *Стром А.Л.* Сопоставление параметров современных и палеосейсмодислокаций //
- Физика Земли. 1993. № 9. С. 38–42.
- Стром А.Л., Никонов А.А. Корреляция между параметрами сейсмодислокаций и магнитудами землетрясений // Физика Земли. 1997. № 12. С. 55–67.
- 6. Трифонов В.Г. Неотектоника Евразии. М.: Научный мир, 1999. 254 с.
- Трифонов В.Г. Общие черты и особенности современной геодинамики континентов // Геодинамика и эволюция тектоносферы. М.: Наука, 1991. С. 144–160.
- Трифонов В.Г., Караханян А.С. Геодинамика и история цивилизаций. М.: Наука, 2004. 668 с.
- 9. *Трифонов В.Г., Трубихин В.М., Аджамян Ж., Джаллад З., Эль-Хаир Ю*. Левантская зона разломов на северо-западе Сирии // Геотектоника. 1991. № 2. С. 63–75.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. Объяснительная записка. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.
- 11. Alchalbi A., Daoud M., Gomez F., McClusky S., Reilinger R., Abu Romeyeh M., Alsouodi A., Yassminh R., Ballani B., Darawcheh R., Sbeinati R., Radwan Y., Al Masri R., Bayerly M., Al Ghazzi R., Barazangi M. Crustal deformation in northwestern Arabia from GPS measurements in Syria: Slow slip rate along the northern Dead Sea Fault // Intern. workshop on active tectonic studies and earthquake hazard assessment in Syria and neighboring countries. Abstracts. Damascus, Syria, 2009. P. 23–24.
- Allen C.R. Geological criteria for evaluating seismicity // Bull. Geol. Soc. Amer. 1975. Vol. 86. № 8. P. 1041–1057.
- Ambraseys N.N., Melville C.P. An analysis of the eastern Mediterranean earthquake of 20 May 1202 // W. Lee (ed.). Historical seismograms and earthquakes of the world. San Diego: Academic Press, 1988. P. 181–200.
- Chorowicz J., Dhont D., Ammar O., Rukieh M., Bilal A. Tectonics of the Pliocene Homs basalts (Syria) and implications for the Dead Sea Fault Zone activity // J. Geol. Soc., London. 2004. Vol. 161. P. 1–13.
- Lagerback R. Late Quaternary faulting and paleoseismicity in northern Fennoscandia, with particular reference to the Lansjarv area, northern Sweden // Geologiska Fareningens Stockholm Forhandlingar. 1990. Vol. 112. № 4. P. 333–354.
- Meghraoui, M., Gomez, F., Sbeinati, R., Van der Woerd, J., Mouty, M., Darkal, A.N., Radwan, Y., Layyous, I., Al Najjar, H., Darawcheh, R., Hijazi, F., Al-Ghazzi, R., Barazangi, M. Evidence for 830 years of seismic quiescence from palaeoseismology, archaeoseismology and historical seismicity along the Dead Sea fault in Syria // Earth Planet. Sci. Let. 2003. Vol. 210. P. 35–52.
- 17. Mörner N.-A. Paleoseismicity of Sweden. Stockholm: JOFO Grafiska AB, 2003. 320 p.
- Muir Wood R. Extraordinary deglaciation reverse faulting in northern Fennoscandia // Earthquakes at North-Atlantic passive margins: neotectonics and postglacial rebound. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1989. P. 141–173.
- Olesen O., Gjelle S., Henkel H. et al. Neotectonics in the Ranafjorden area, northern Norway // NGU (Geol. Survey of Norway) Bul. 1995. Vol. 427. P. 5–8.
- Olesen O., Henkel H., Lile O.B. et al. Neotectonics in the Precambrian of Finnmark, northern Norway // Norsk Geologisk Tidsskrift. 1992. Vol. 72. P. 301–306.
- Rukieh M., Trifonov V.G., Dodonov A.E., Minini H., Ammar O., Ivanova T.P., Zaza T., Yusef A., Al-Shara M., Jobaili Y. Neotectonic Map of Syria and some aspects of Late Cenozoic evolution of the north-western boundary zone of the Arabian plate // J. Geodynamics. 2005. Vol. 40. P. 235–256.
- Sbeinati M.R., Darawcheh R., Mouty M. The historical earthquakes of Syria: an analysis of large and moderate earthquakes from 1365 B.C. to 1900 A.D. // Ann. Geophys. 2005. Vol. 48. № 3. P. 347–435.
- 23. Sbeinati M.R., Meghraoui M., Suleyman G., Gomez F., Al Najjar H., and Al-Ghazzi R. Timing of earthquake ruptures at the Al Harif aqueduct (Dead Sea fault) from archaeoseismology, paleoseismology and tufa cores / Intern. workshop on active tectonic studies and earthquake hazard assessment in Syria and neighboring countries. Abstracts. Damascus, Syria, 2009. P. 78.
- Shebalin N.V., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. et al. A unified seismotectonic zonation of Northern Eurasia // J. Earthquake Predict. Res. 2000. Vol. 8. № 1. P. 8–31.
- Trifonov V.G., Dodonov A.E., Karakhanian A.S., Ivanova T.P., Bachmanov D.M., Ammar O., Rukieh M., Minini H., Al Kafri A.-M., Ali O., Al Yusef Sh., Yusef A., Zaza T., Ali M. Seismotectonics of Syria and surrounding areas / Intern. workshop on active tectonic Studies and earthquake hazard assessment in Syria and neighboring countries. Abstracts. Damascus, Syria, 2009. P. 76–77.
- Trifonov V.G., Machette M.N. The World map of major active faults Project // Ann. Geofis. 1993. Vol. 36. № 3-4. P. 225–236.
- Wells D.L., Coppersmith K.H. Empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1994. Vol. 84. P. 974–1002.