

ГЛУБИНЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЕРРИТОРИИ АЗЕРБАЙДЖАНА И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ЧАСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Б.М.Панахи

*Институт геологии НАН Азербайджана
AZ1143, Баку, просп. Г.Джавида, 29А*

В работе исследованы глубины очагов землетрясений территории Азербайджана и прилегающей части Каспийского моря. Установлена поверхностная природа сейсмичности и связь подавляющего количества толчков с интервалом глубин 10-20 км, соответствующим осадочному комплексу образований, сложенному некомпетентными, пластическими толщами. Слабая сейсмичность связана с приповерхностными разделами коры и обусловлена процессами фазовой и механической неустойчивости, проявляющейся в результате дефлюидизации, а также формирования углеводородов в нефтегазоносных областях. Отмечается отсутствие очагов землетрясений с промежуточными и глубокофокусными очагами и, следовательно, оснований для утверждения о наличии в регионе активной зоны Беньофа.

1. Введение

Глубина очага землетрясения является важной характеристикой, определяющей не только интенсивность сейсмического эффекта на поверхности, но и проявление остаточных сейсмодислокаций, имеющих первостепенное значение как для оценки сейсмической угрозы, угрозы вторичных геологических процессов, вызванных землетрясениями, так и для понимания процессов деформирования земной коры на разных глубинах в зависимости от ее глубинной структуры. Иначе говоря, исследование глубин очагов землетрясений позволяет выявить характер распределения сейсмических событий с глубиной, а также закономерности проявлений сейсмичности изучаемых областей, что необходимо для понимания механизма и условий формирования очагов землетрясений.

Сведения о глубинах очагов землетрясений для Кавказско-Каспийского региона, как, впрочем, и для всей центральной части Средиземноморского подвижного пояса, довольно неоднородны. В целом, определение глубины очага является одним из наиболее важных элементов инструментальной сейсмологии, в особенности региональной, и осуществляется на основе трех основных способов: способа Вадати, способа засечек и моментов вступления отраженных волн типа pP, sP, sS . Способ Вадати может успешно применяться при условии, когда эпицентральные расстояния со-

измеримы с глубинами очагов землетрясений данной области. Иными словами, точное определение глубин очагов землетрясений здесь может быть достигнуто за счет расположения сейсмических станций на расстояниях порядка 25-30 км. Однако расстояния между сейсмическими станциями в данном регионе в основном значительно превышали эту величину, за исключением Джавахетского нагорья, где благодаря удачной дислокации станций обеспечивается высокая точность определения глубин местных землетрясений (0-10 км).

В настоящее время положение сейсмических станций на большей части Кавказа практически не изменилось в сторону их уплотнения. По-прежнему развитие сетей направлено на увеличение чувствительности систем регистрации сейсмических сигналов, наглядным примером чего является размещение в Азербайджане автоматической системы «Кинеметрикс». В связи с этим надо полагать, что в локализации глубин очагов землетрясений все еще сохраняется не удовлетворительная точность. Во многих случаях события подразделяются по глубинам на две группы, соответствующие интервалам глубин 0-10 и 25 км. Иногда более грубо они подразделяются на расположенные в пределах земной коры и расположенные под корой. Лишь для небольшого количества землетрясений глубина очагов указывается с большей точностью (± 10 км) на основе результатов наблюдений стан-

ций, расположенных близко к очагу, или обработки макросведений о поверхностном эффекте землетрясений. Как правило, это касается землетрясений с очагами в пределах земной коры данного региона.

Отраженные волны довольно хорошо выделяются удаленными станциями ($\Delta > 2000\text{km}$) на записях сильных землетрясений (Введенская, 1955). Выделение вступлений отраженной волны типа sP на записях близких станций представляется возможным только для относительно сильных глубоких землетрясений. Для коровых землетрясений выделение вступлений отраженных волн на сейсмограмме затруднено присутствием прямых, дифрагированных, обменных и других волн, связанных с различными границами раздела внутри коры.

Важное значение для определения глубин очагов землетрясений Кавказско-Каспийского региона имеет разработка локальных годографов сейсмических волн. Во многих случаях глубины очагов определялись по стандартной методике в соответствии с региональными годографами Джеффриса-Буллена или Лебедевой-Левицкой (Лебедева, 1958; Левицкая, 1949), что также вносило существенные неточности в определения глубин. Число локальных годографов, разработанных для различных областей Кавказа, в том числе и для Шамахинской области (Кузнецов, 1956), не так велико, и в настоящее время все они из-за дефицита данных остаются далекими от совершенства.

Однако, несмотря на отмеченные выше проблемы, в данной статье на основе всестороннего анализа первичных сведений делается попытка оценки глубин очагов землетрясений Кавказско-Каспийского региона.

2. Исходные данные

В настоящей работе в качестве исходных использованы данные, представленные в опубликованных бюллетенях телесеismicкой сети бывшего СССР за 1938-1939 гг., сети сейсмических станций за 1940, 1941-1951, 1952-1961 гг. (Бюллетень..., 1938-1940; Бюллетень..., 1954-1964), единой сети сейсмических станций за 1962-1991 (Землетрясения в СССР, 1964-1997), сейсмологических бюллетенях за 1962-1963 и 1964-1973 гг. (Сейсмологический бюллетень..., 1965-1977),

бюллетенях кавказских станций за 1933-1937, 1958-1960, 1971-1973 гг. (Бюллетень..., 1973-1975), и 1974-1984 гг. (Сейсмологический бюллетень..., 1976-1989), в каталогах (Атлас землетрясений..., 1962; Кондорская, Шебалин, 1977), в специализированном каталоге землетрясений Северной Евразии, а также в тестовом каталоге «Кавказ», выполненном в рамках проекта GSHAP (Кузнецов, 1956), в которых собраны, систематизированы и проанализированы макросейсмические и инструментальные сведения за период порядка 4000 лет.

Кроме того, в работе широко использованы материалы Национального Центра Данных Азербайджана (СТВТО) за период 1999-2005 гг., базы данных Института геологии Национальной Академии наук Азербайджана, Мирового Центра Данных по физике твердой Земли, Геофизического Центра Российской Академии наук (Годзиковская, 2000), Геофизической Службы Российской Академии наук (GS RAS), Национальной службы информации о землетрясениях США (NEIC), опубликованные материалы РЦСС НАН Азербайджана и др.

3. Состояние проблемы

К исследованию распределения очагов землетрясений с глубиной в пределах различных структурно-формационных зон рассматриваемого региона исследователи обращались во многих публикациях. Однако, несмотря на то, что исходными данными для такого анализа являлась практически единая база данных, составленная на основе результатов наблюдений различных сетей, модели распределения очагов с глубиной часто имели противоречивый характер.

Впервые определение глубины очагов кавказских землетрясений предпринял Михалевский А.И. (1923), который вычислил глубины Ахалкалакского 1899 и Горийского 1920 гг. событий, составившие 16 км в обоих случаях. В последующие годы к оценке глубины этих событий обращались разные авторы. Полученные ими величины отличались от первичной оценки и в общем виде варьировали в близком к ней интервале 8-20 км.

В бюллетенях международного сейсмологического центра в Эдинбурге (ISC) за период 1964-1972 гг. большая часть землетрясе-

ний Кавказа имеет глубины 40 км. Проведенное Т.П.Поляковой (1985) сопоставление данных телесеismicической сети с результатами наблюдений единой сети сейсмических станций СССР для периода 1964-1973 гг. (Землетрясения в СССР, 1964-1997; Сейсмологический бюллетень, 1965-1977), показало, что оценки глубин по ISC сильно завышены. В детальных работах по Кавказу (Джибладзе, 1980) отмечается, что большая часть землетрясений региона находится на глубинах 10 км. Несовпадение определений глубин по телесеismicическим данным и региональным сетям позволяет нам констатировать крайнюю важность точного определения глубин очагов землетрясений региона.

Надо полагать, что переопределение глубин очагов землетрясений, полученных по данным мировой сети телесеismicических станций, не имеет смысла из-за отсутствия достаточного количества станций и их равномерно распределения (оптимального с точки зрения расстояния между станциями). Однако такие переопределения глубин для сейсмических событий региона проводились по данным единой сети региональных сейсмических станций бывшего СССР. Но и в этом случае сейсмическая сеть отличалась отсутствием достаточной густоты станций.

Для периода 1911-1958 гг. Лебедева Т.М. (1958) выделяла землетрясения с очагами под земной корой, в их числе землетрясение 10.09.1954 с глубиной 80 км. Шебалин Н.В. (1961) и Цхакая А.Д. (1962) также указывали на наличие на Кавказе отдельных очагов с фокальными глубинами в верхней мантии. Однако данные по ряду этих очагов впоследствии были переопределены, и в «Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР» (1977) они уже вошли как коровые. Годзиковская А.А. (1988) на основании анализа наблюдений на сейсмической станции «Белый Уголь» обращала внимание на факт существования в Терско-Сунженском прогибе зоны с мантийными землетрясениями на глубинах 80-120 км. В результате дополнительного анализа имеющихся инструментальных материалов при подготовке «Специализированного каталога землетрясений Северной Евразии», а также в тестовом каталоге «Кавказ», выполненном в рамках

проекта GSHAP (Кондорская, Уломов, 1993), вновь появились сведения об очагах в верхней мантии Кавказа, например, в районе Терско-Сунженского прогиба.

Общее распределение очагов землетрясений по глубинам за период 1900-2001 гг., сделанное на основе данных тестового каталога «Кавказ», представлено на рисунке 1. Данный рисунок, включающий распределения гипоцентров за различные периоды представительности исходных сейсмологических данных (1900-1959, 1960-1976, 1977-1993, 1994-2001 гг.) демонстрирует крайне неравномерный характер данного распределения.

Таким образом, неопределенность в вопросе оценок глубин очагов землетрясений очевидна. Надо полагать, что эта неопределенность в достаточной степени обусловлена принципиальными различиями между понятиями «очаг» и «гипоцентр». Результаты анализа волновых картин землетрясений при определении глубин очагов землетрясений привязываются к точечной природе гипоцентра. Хотя реально очаг землетрясения представляет собой объемную структуру, одним из основных параметров которого является его вертикальная протяженность. Обычно эта величина для умеренных и сильных событий составляет несколько десятков километров. При этом вертикальная протяженность очагов сильнейших землетрясений может составлять 100 км и более. В принципе для поверхностных очагов ближайшая к поверхности часть очага может создать локальное волновое поле, отличное от поля, создаваемого более глубокой его частью, что предопределяет сложность суммарного волнового поля и характера эффекта на поверхности земли.

Соотношения, связывающие магнитуду землетрясений с линейными размерами очагов (Ризниченко, 1976; Шебалин, 1971), имеют следующий вид: $\lg l_z = 0.3M - 0.8$, где l_z - вертикальная протяженность очага. Для Кавказа также может быть использовано соотношение $M = 3.98 + 1.02 \log A$, разработанное в работе (Wells and Coppersmith, 1994).

Модели некоторых очагов землетрясений юго-восточной части Большого Кавказа, составленные на основе анализа макросейсмической информации (Агамирзоев, 1987),

основывались на связи очагов разрушительных землетрясений с осадочным чехлом, в котором мощность прочных пород составляла более 50% вертикальной протяженности очага, а сейсмогенез обуславливался гравитационно-неустойчивым состоянием системы чехол – кристаллический фундамент и вспарыванием земной коры.

В качестве особенности распределения очагов землетрясений Среднекуринской впадины отмечались (Махмуд-заде, 1995) четыре уровня концентрации гипоцентров, наибольшее количество которых связывалось с

глубинами 9-13 и 21-25 км, а ответственными за сейсмогенез образованиями принимались «гранитный» и верхи «базальтового» слоев. Для восточной части Центрального Кавказа глубины очагов в большинстве случаев составляли 25 км, а в некоторых случаях – до 60 км. При этом точность определений составляла ± 10 км (Левицкая, 1949). Согласно (Карапетян, 1953), очаги землетрясений Малого Кавказа залегают преимущественно в пределах земной коры. В целом глубины очагов на Кавказе возрастают в восточном направлении.

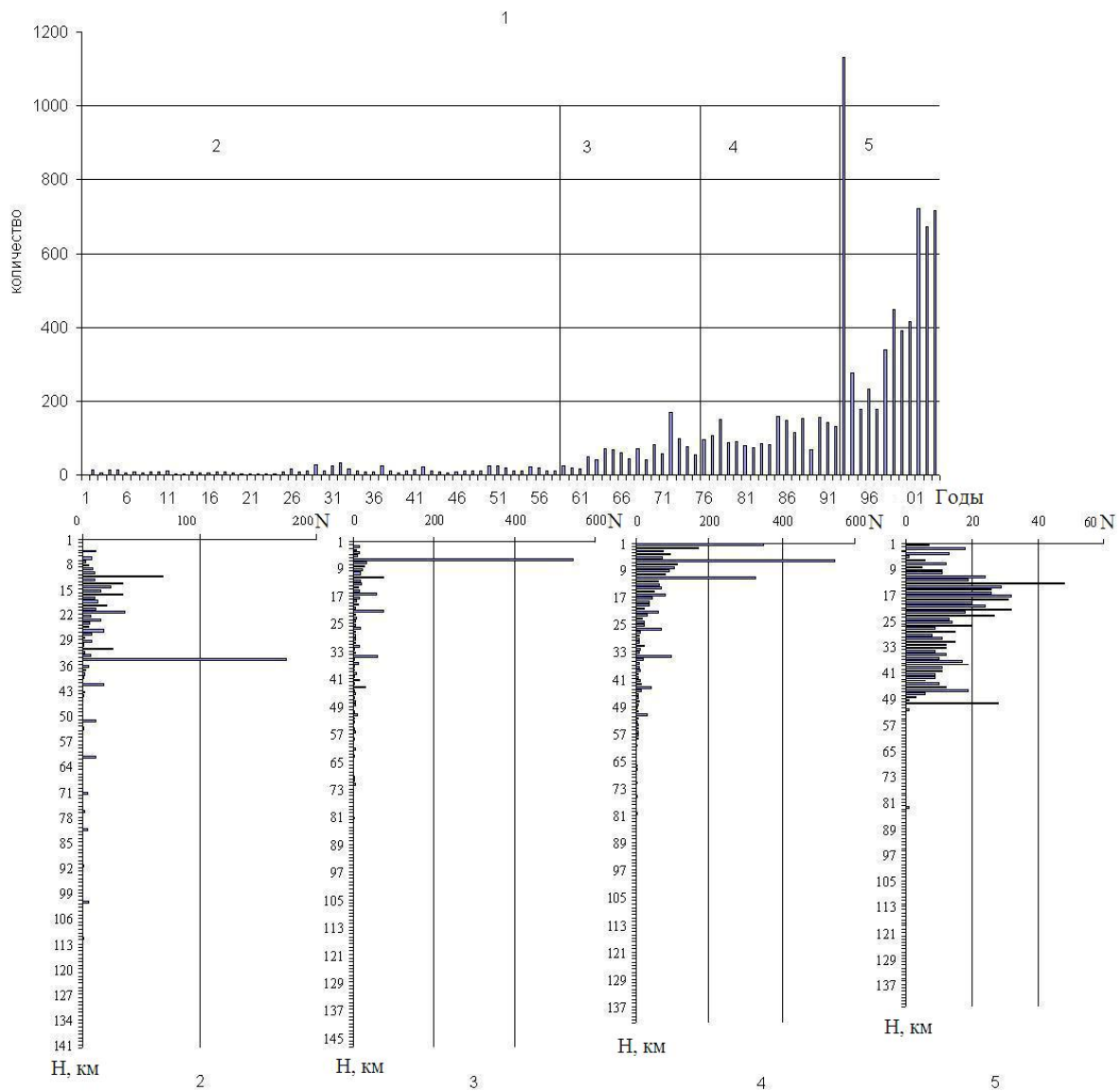


Рис. 1. Распределение землетрясений по глубинам для периода 1900-2001 гг.
 1-общее распределение за период 1959-2001 гг.; 2-5 распределение событий по глубинам для периодов: 2 – 1900-1959 гг.; 3 – 1960-1976 гг.; 4 – 1977-1993 гг.; 5 – 1994-2001гг.

Поперечная неоднородность в распределении гипоцентров слабых толчков для восточной части Большого Кавказа ($K=7-13$) прослеживается на основании новых данных о глубинах очагов землетрясений (Рогожин, Рейснер, 1988), что может быть обусловлено поперечными морфоструктурными блоками и разделяющими их линейными элементами второго ранга, хорошо увязывающимися с поперечными, транскавказскими зонами общего увеличения и уменьшения морфологической сложности складчатости.

Связь большого количества очагов землетрясений с вулканогенно-осадочными и терригенно-карбонатными образованиями мезозоя выявлена (Panahi, 1988) на территории Каспийского моря, где глубины очагов землетрясений рассматривались в региональном аспекте с точки зрения сеймотектонического районирования территории моря.

Проблемы распределения гипоцентров сейсмических событий обсуждались также в работах, посвященных блоково-слоистой модели земной коры Кавказско-Копетдагского региона (Кондорская, Тушко, 1993). Отмечается концентрация до 90% гипоцентров землетрясений и выделенной энергии сейсмических волн на глубинах до 50 км, т.е. в упруго-хрупком слое литосферы (Левин и др., 2001). Такой характер распределения, а именно: убывание количества очагов с глубиной, наблюдается повсеместно, но на Кавказе эта тенденция выражена значительно ярче. Причем землетрясения умеренных и высоких магнитуд также проявляются из поверхностных очагов. При этом следует помнить, что характер сейсмичности региона Кавказ – Каспийское море имеет умеренный характер (Panahi, 2004; Panahi, 2006). Наличие гипоцентров землетрясений с $M \geq 5.0$ на глубинах свыше 40-70 км, т.е. в пределах пластичного слоя литосферы, объясняется (Левин и др., 2001) разрушением блоков упруго-хрупкой литосферы при С-субдукции. Кроме того, в Кавказско-Каспийском регионе предпринимались и другие попытки привлечения результатов анализа глубин очагов землетрясений для выявления активной зоны субдукции (Халилов и Халилов, 1989).

Пространственное распределение оча-

гов землетрясений Восточного Кавказа и региона Каспийского моря с глубиной (Guliyev and Panahi, 2004), показавшее их приуроченность в рассматриваемом регионе в основном к глубинам 0-15 и 20-30 км, отмечает их связь с осадочной толщей, что в отличие от традиционных точек зрения дает основание считать ее основным структурным элементом, ответственным за сейсмогенез в рассматриваемом регионе.

4. Глубины очагов

Анализ макросейсмических и инструментальных данных по рассматриваемой территории за период последних 4000 лет (Кондорская, Уломов, 1993) показал, что очаги относительно сильных и слабых землетрясений рассматриваемого сегмента Средиземноморского подвижного пояса располагаются в пределах коры и соответствуют глубинам 0-10 и 15-25 км (Panahi, 1988; Panahi, 2000; Panahi, 2004; Panahi, 2006). Для Восточного Кавказа и прилегающей части Южно-Каспийской впадины, где к этим интервалам глубин приурочено до 87% общего количества событий, эта связь считается более выразительной (Guliyev, Panahi, 2004). За основу анализа был принят «Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г.» (1977), в котором наряду с окончательными определениями глубин очагов присутствовали также и ошибки их определения, классифицированные по 6-ти классам точности. В каталоге наряду с глубинами очагов землетрясений, определенными инструментально, указывались также ошибки их определения, выраженные в линейной форме. Для глубин, определенных по макросейсмическим данным, указывались ошибки их определения в логарифмической (интервальной) форме. При определении глубин по макросейсмическим данным (для некоторой глубины h) очевидно, что пределы ошибок заключены между h/k и hk , где k - некоторое число. Таким образом, величины максимальной логарифмической погрешности, в кратное число раз превышающие глубину очага, были приняты за истинные глубины очагов и возведены в ранг «глубокофокусных». В результате в пределах рассматри-

ваемых областей выявлено около 80 событий, максимальная ошибка определения глубин которых превышала мощность земной коры. Из числа землетрясений региона исключены некоторые события исторического прошлого, сведения о которых весьма ограничены или не точны и не могут быть использованы для оценок глубины.

Исходные инструментальные данные об очагах землетрясений высоких и умеренных магнитуд 20.02.1906, 25.03.1913, 19.02.1924, 05.07.1931, 20.10.1931, 17.01.1934, 09.04.1935, 14.11.1953, 18.09.1961, 05.10.1968, 14.12.1973 гг., глубины которых в каталогах соответствовали отметкам 60-90 км и более до 139 км, пересмотрены, и дана их новая интерпретация (Джибладзе, 1983). Выявленные автором на записях землетрясений сейсмические волны P, P*, P' и S, S*, S' явно свидетельствуют о коровой природе очагов, причем большинство из них располагалось в интервале глубин $h=15-25$ км, за исключением событий 20.10.1931 и 09.04.1935 гг., очаги которых были связаны с более глубокими разделами коры ($h=45-50$ км).

Макросейсмические оценки глубин выполнялись двумя известными способами: по затуханию интенсивности (δI , Δ) и по соотношению балльности в эпицентре и магнитуды (I_0 , M). Для всех землетрясений, имеющих в каталоге максимальную логарифмическую ошибку определения глубины, превышающую мощность коры, глубины оценивались расчетным путем (Panahi, 1988). Расчеты велись с помощью уравнения макросейсмического поля с коэффициентами b , ν и c , рассчитанными для Большого Кавказа (Кулиев, 1980).

В таблице приведены основные сведения о некоторых очагах сильных землетрясений, в ней наряду с оценками глубин согласно (Кондорская, Шебалин, 1977) приводятся также оценки, принятые на основе различных пересчетов.

Результаты проведенных расчетов показали, что очаги умеренных и сильных землетрясений Кавказ-Копетдагского сегмента Средиземноморского подвижного пояса располагаются в пределах коры и имеют широкий интервал глубин от 7 до 50 км. Очаг землетрясения с глубиной, превышающей мощность зем-

ной коры (до 139 км), отмечен согласно (Кондорская, Тушко, 1993) в пределах Среднего Каспия. Известны также очаги, связанные с верхами верхней мантии в пределах Северного Кавказа (Годзиковская, 1988).

Землетрясения низких энергий происходят в пределах Кавказа и на территории Каспийского моря повсеместно, с высокой повторяемостью и представительностью минимального уровня магнитуд землетрясений. Однако до настоящего времени информация о слабых и неощутимых толчках в исследуемом регионе широко не обсуждалась. В этом отношении можно отметить лишь карты сейсмической активности по A_{10} , составленные для событий низких энергий Каспийского моря ($M=2.8-3.9$) (Панахи, Каспаров, 1988), показавшие их пространственное совпадение с зонами больших мощностей осадочных образований.

В отношении распределения очагов землетрясений по глубинам необходимо отметить, что наблюдаемая связь подавляющего количества известных толчков с глубинами 10-20 км соответствует осадочному комплексу образований. Уровень деформации осадочного слоя высок. Данный структурный комплекс земной коры сложен некомпетентными, пластическими толщами, где отсутствует возможность длительного накопления больших напряжений, а тектоническая активность выражается в быстрых современных геологических движениях (складкообразовании, сдвиговых и надвиговых деформациях), обусловленных внутренним перераспределением масс. Более вероятно, что энергия деформации здесь высвобождается в форме большого числа слабых толчков (возникающих в активном интервале большой продолжительности), чем малого числа сильных толчков, возникающих в коротком активном периоде.

Данные наблюдений недостаточно точны для надежных определений глубин слабых очагов, но все же они позволяют заключить, что большинство очагов расположено, в общем, на одной и той же глубине – приблизительно 10-15 км с немногими отдельными отклонениями. Данной глубине в некоторых случаях соответствует слой пониженной скорости, где можно ожидать уменьшение прочности среды.

Параметры некоторых сильных землетрясений Кавказа и региона Каспийского моря

№	Год	Число/ месяц	$\varphi^{\circ}N$	$\lambda^{\circ}E$	M	I	H, км	Другие определения глубины	Принятая нами глу- бина
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1903	5.7	41.8	48.7	5.5	VI	40/26-60	$h_{IM}=50$	50
2	1906	20.2	41.5	48.4	5.9	VI	75/50-105	$h=70$ $h=80$ $h=25$	25
3	1907	21.8	42.7	48.3	5.3	V-VI	43/29-65	$H=32$ $h=50$ $h=40$	40
4	1909	30.10	42.4	48	5.8	VI	40/20-80	$h=50$	50
5	1911	7.6	41	50.5	6.4	VI-VII	46/30-70	$h=40$ $h=52$ $h=100$, $h=30$	30
6	1912	10.8	43.5	45.1	5.7	VIII	50/5-70		15
7	1913	25.3	41.8	48.3	5.7	VII	70/45-105	$h=40$ $h=70$ $h=40$ $h=15$ $h=30$	15
8	1914	4.11	40.3	47.5	4.6	V	40/20-80	$h=35-40$	35-40
9	1919	8.1	40.9	42.2	5.2	VI	40/27-60	$h=45$ $h=36$ $h=40$	40
10	1924	19.2	39.4	48.6	6.6	VII	75/50-115	$h=75$ $h=112$ $h=50$ $h=15$ h -норм.	15
11	1927	13.1	40.2	46.4	4.8	IV-V	42/21-84	$h=45$	45
12	1931	19.6	43	49.8	4.5		40/15-120		
13	1931	5.7	39.3	47.8	5.3	VI	60/40-90	$h=45$ $h=75$ $h=40$	40
14	1931	20.10	42.5	50.8	6.2	VII-VIII	70/40-105	$h=65$ $h=90$ $h=100$ $h=55$ $h=0-50$ $h=25$	25
15	1933	9.4	43.1	48.5	4.5		40/20-80		40
16	1934	17.1	42.3	51	5.2	V-VI	60/40-90	$h=60$ $h=70$ $h=20$ $h=36$	20
17	1935	9.4	42.1	48.8	6.3	VI	90/60-135	$h=100$ $h=30$ $h=30$	30
18	1948	29.6	41.6	46.4	6.1	VII	48/32-72	$h=40$ $h=53$ $h=49$ $h=80-100$	49
19	1953	14.11	43	46	3.8		70 ± 20		25
20	1955	23.8	43.2	46.1	4.6	V	40/27-60	$h=35-40$	35-40
21	1955	25.8	43.3	46.2	4.4	IV-V	40/20-80	$h=30$	
22	1955	31.8	43.1	46.2	4.4		40/20-80		40
23	1961	18.9	41.1	50.2	6.6	VII	64 ± 10	$h=40$ $h=0-25$	25
24	1961	19.9	40.9	49.9	4.4	V-VI	60/40-90	$h=30$	30
25	1962	23.3	41.5	49.1	4.2	V	40/20-60	$h=23$	23
26	1963	27.1	41.1	49.8	6.2	VII-VIII	55/37-83	$h=50$ $h=85$ $h=43$, $h=36$	26
27	1986	6.3	40.2	51.6	6.1	V	23	$h=26$	23
28	1989	16.9	40.1	52.2	6.3	IV-V	32		32
29	1989	17.9	40.1	51.8	6.2		32		32
30	2000	25.11	40.2	50.07	6.2		10-94		20-22

Распределения $M = f(H)$, составленные (Varazanashvili, 1999) для четырех структурно-формационных зон Грузии, имеют примерно идентичный характер. Графическое распределение магнитуды событий и глубин их очагов, представленное на рисунке 2, позволяет отметить два основных интервала глубин: 3-7 и 9-15 км, с которыми связаны

землетрясения. События с $M \leq 5$ совпадают с первым, а события более высоких магнитуд $M > 5$ обнаруживают связь со вторым интервалом глубин.

Преобладающее число гипоцентров слабых землетрясений Северной Евразии расположено на глубинах до 10-15 км (рис. 3), однако с ростом магнитуды (что соответству-

ет увеличению вертикальной протяженности очагов) их гипоцентры заглубляются, отражая местоположение начала вспарывания пород внутри очага. При любом землетрясении сейсмическая энергия излучается как по разрыву в вертикальной плоскости, так и по горизонтали. Следовательно, за исключением очень слабых землетрясений, положение эффективного источника сейсмических волн не совпадает с фокусом.

В работе Н.В.Шебалина (1971) предложена методика определения и картирования предельной магнитуды землетрясения, основанная на том предположении, что возможности накопления энергии ограничены размерами сейсмоактивной зоны, а возможности одновременного ее выделения – размерами очага, лимитированными мощностью сейсмоактивного слоя. При этом данные о мощности и размерах сейсмоактивных зон получены автором на основании распределения максимальных глубин очагов землетрясений.

Захарова А.И. и Яковлева И.Б. (1975) использовали значительный объем данных по глубинам очагов землетрясений Узбекистана для установления их связи с энергией сейсмических событий. Это оказалось возможным

благодаря систематическому определению глубин очагов землетрясений Узбекистана, начатому после введения в конце 60-х в обработку данных высокочувствительной сети локальных годографов Е.В.Бутовской и И.Б.Яковлевой для восточной и западной частей соответственно.

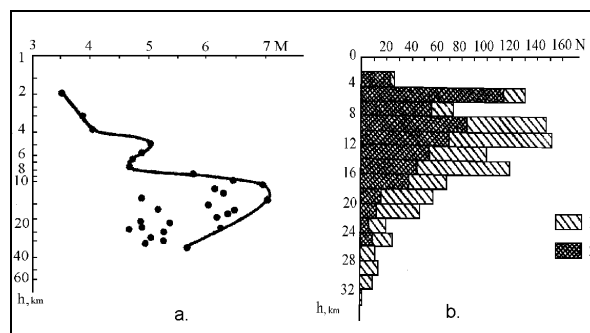


Рис. 2. Зависимость глубины очагов землетрясений от магнитуды событий и распределение очагов по глубине для территории Грузии

a: линия, отражающая зависимость $M_m = f(h)$,
 b: распределение для периодов: 1 - 1900-1997 гг.;
 2 - 1962-1997гг.

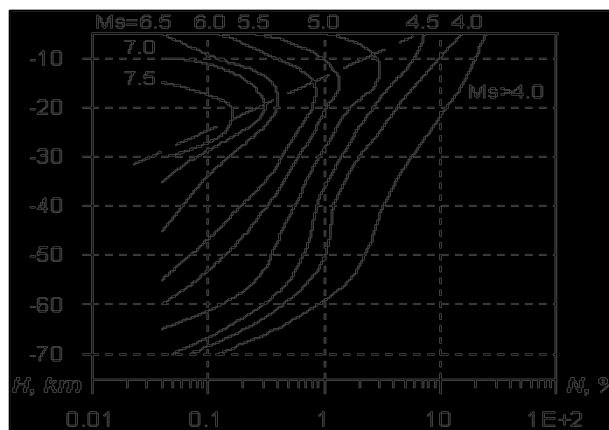
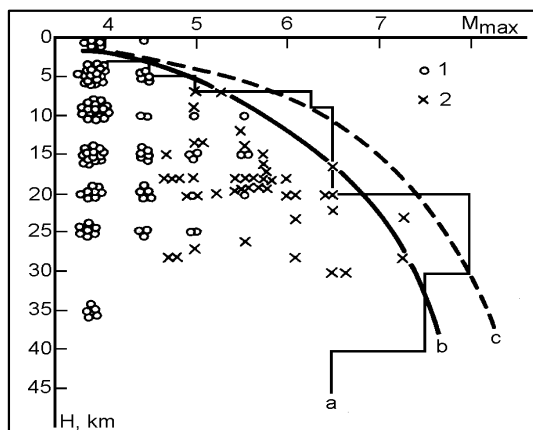


Рис. 3. Предельное значение магнитуды M в зависимости от глубины землетрясений H (слева). Распределение по глубине H (км) количества N_M (%) гипоцентров внутрикоровых землетрясений разных магнитуд M (справа)

Слева: 1-инструментальные данные; 2-макросейсмические; а-экспериментальная зависимость $M = f(H)$ Н.В.Шебалина для Средней Азии; б-теоретическая кривая $M = f(H)$ Н.В.Шебалина для Средней Азии; в- экспериментальная зависимость $M = f(H)$ для Узбекистана.

Справа: Пунктиром показан тренд увеличения глубины максимальных значений N_M с ростом магнитуды (по Уломову В.И.).

Графики, приведенные на рисунках 2 и 3, однозначно свидетельствуют о связи слабой сейсмичности с малыми глубинами (приповерхностными разделами коры). Надо полагать, что они обусловлены процессами фазовой и механической неустойчивости, проявляющейся в результате дефлюидизации, а также формирования углеводородов в нефтегазоносных областях. Фазовые переходы в системах подземные воды – газы, твердые минералы – подземные воды, твердая фаза – газы приводят к возникновению возбужденных зон (Гулиев, 1997; Гулиев, 1999), которые могут проявляться в виде слабых землетрясений (рис. 4).

Составление подобных зависимостей в целом для всей территории Кавказа не представлялось возможным из-за отсутствия допустимого блока определений магнитуд землетрясений и тем более их глубин. Из 1350 сейсмических событий 1959-го года, надежные определения глубин и магнитуд имеются только для более чем 1200 толчков, отмеченных в районе Джавахетского нагорья, где была развернута оптимизированная сеть станций. Для интервала наблюдений 1900-1959 гг. лишь для крайне небольшого количества событий имеются определения глубин и магнитуд. Для интервала же 1960-1976 гг. глубины очагов определялись лишь для 29% общего годового количества землетрясений Кавказа, среди которых подавляющее большинство составляли события Джавахетского нагорья.

В отношении распределения очагов землетрясений по глубинам необходимо отметить, что наблюдаемая связь подавляющего количества известных толчков с глубинами 10-20 км соответствует осадочному комплексу образований. Собственно говоря, в других областях Восточного Кавказа и региона Каспийского моря, где грязевой вулканизм не развит, также известны очаги землетрясений, связанные с осадочной толщей (Агамирзоев, 1987; Махмуд-заде, 1995; Панахи, Каспаров, 1988). Однако в том случае она менее выражена. Это означает, что главенствующая роль в сейсмогенезе областей развития грязевых вулканов принадлежит мощной осадочной толще, достигающей в отдельных случаях мощности до 25 км.

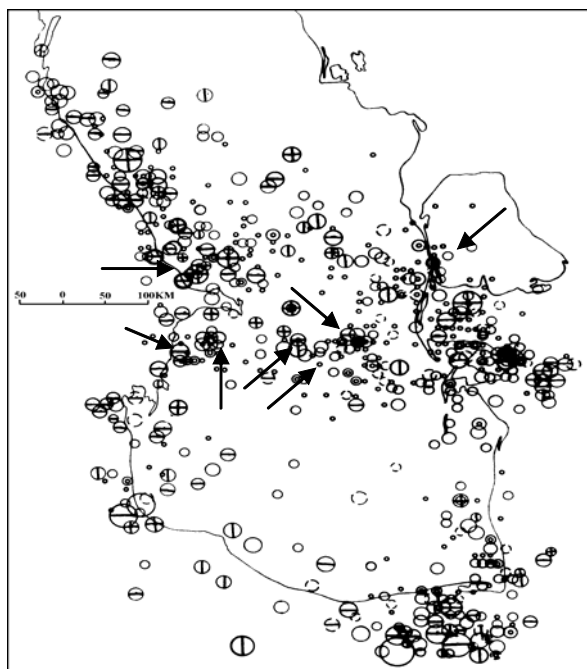


Рис. 4. Карта эпицентров территории Каспийского моря (Панахи, Каспаров, 1988).

Стрелками показаны скопления эпицентров, характеризующиеся высокой повторяемостью слабых событий, которые могут ассоциироваться с возбужденными зонами.

5. Глубины очагов и гипотеза тектоники плит

В своей начальной форме гипотеза тектоники плит выглядела достаточно упрощенно и встречала ряд принципиальных возражений. Гипотеза требовала серьезного научного обоснования, и ее развитие всецело зависело от развития геофизики. Очевидно, что гипотеза тектоники плит явилась детищем геофизической концепции, сформировавшейся более 50 лет тому назад, задолго до появления данной гипотезы. Хотя гипотеза тектоники плит использовала некоторые научные достижения, полученные в рамках геофизической концепции, она не может рассматриваться адекватной ей.

Основной частью гипотезы тектоники плит является идея о так называемых зонах Беньофа, представляющих собой цепочку очагов глубокофокусных землетрясений, аппроксимируемых фокальной плоскостью, падающей под материк примерно под углом 22-40°. Свое название эти зоны получили от имени американского сейсмолога Хьюго Беньофа, выявившего их в пределах регионов Тихоокеанской материковой окраины. Хотя с

таким же успехом эти зоны можно было бы назвать зонами Заварицкого или Вадати, по именам ученых, впервые давших геологическую интерпретацию этих зон. Сейсмофокальные зоны значительно раньше были описаны К.Вадати, Б.Гуттенбергом, Заварицким и даже Н.Шатским.

Со временем зоны Бенъофа, разработанные на примере островных дуг, стали переносить на внутренние зоны континентов, в результате чего эвгеосинклинали континентов стали рассматриваться с различной степенью успеха как древние, реликтовые и активные зоны Бенъофа. В частности, попытки выявления зоны Бенъофа были предприняты и на Восточном Кавказе, включая и территорию Каспийского моря. Инициатива в этом смысле принадлежит А.Н.Вардапетяну (1979), который, ссылаясь на глубинные землетрясения, аномалии гравитационного поля и другие геофизические данные, выделил зону Бенъофа под Восточным Кавказом и отметил поддвиг Черноморской и Южно-Каспийской плит под континентальную плиту. Позже геологическое развитие Кавказа с позиций новой глобальной тектоники было представлено в работе Ш.А.Адамия и И.Д.Шавишвили (Adamiya and Shavishvili, 1979).

В 80-е годы интерес к глубинам очагов землетрясений Кавказа и территории Каспийского моря повысился, что было обусловлено попытками выявления в данном регионе современной зоны субдукции, и для обоснования мобилистских построений был предпринят активный поиск широкофокусных землетрясений. Хотя, согласно общепринятой классификации, к широкофокусным очагам относят очаги землетрясений с глубинами более 300 км, что почти на порядок больше, чем большинство реальных глубин очагов землетрясений в рассматриваемом регионе. Таких глубин нет не только в регионе Кавказ-Копетдаг, но и в пределах всей центральной части Средиземноморского подвижного пояса. Более того, сильно атрофирована в регионе промежуточная сейсмичность (глубины очагов 150-300 км), которая проявила себя только в районе о-ва Кипр, по границе Ирана с Пакистаном и почти на всем протяжении хр. Загрос.

С другой стороны, если, даже отвергая имеющиеся материалы и расчеты, принять глубину самого глубокого в регионе очага Каспийского землетрясения 1935 г. равной

139 км, мы все равно не получим широкофокусного очага, поскольку с этими глубинами, согласно классификации Бенъофа, связываются «поверхностные очаги», которые к выявлению сейсмофокальной плоскости (по Бенъофу) привлекаться не могут (рис. 5).

Надо полагать, что геологическая интерпретация распределения землетрясений по глубинам должна производиться достаточно осторожно. Очаги землетрясений в регионе являются поверхностными, расположены в интервале глубин 0-50 км и имеют в основном коровый характер. Мощность земной коры здесь варьирует в пределах 30-52 км (Гаджиев, 1965), что означает ошибочность привлечения коровых очагов ($40 \text{ км} \leq h \leq 50 \text{ км}$) к выявлению зоны широкофокусных землетрясений. Таким образом, выявление активной зоны субдукции (Вардапетян, 1979; Халилов, Халилов, 1989; Dewey et al., 1973; McKenzie, 1974) в регионе Кавказ-Копетдаг не обосновано реальным сейсмологическим материалом. Поверхностная сейсмичность и отсутствие в регионе землетрясений с промежуточными ($h=150-300 \text{ км}$) и широкофокусными ($h>300 \text{ км}$) очагами, на наш взгляд, наиболее комфортно согласуются с представлениями (Хаин, Лобковский, 1994) об условиях проявления остаточной мантийной сейсмичности (межплитовой сейсмичности) Альпийского пояса Евразии.

Особенности распределения напряжений с позиции тектоники литосферных плит объясняют погружением Южно-Каспийской микроплиты под Евразийскую и, как следствие, сильным изгибом первой. При этом считается, что подошва земной коры Южно-Каспийской микроплиты испытывает напряжения сжатия, тогда как осадочный чехол подвергается растяжению. Нужно отметить, что ориентация осей напряжений, действующих в очагах землетрясений Каспийского моря, выявлена Э.Б.Агаларовой (1975) для четырех событий (18.09.1961, 19.09.1961, 27.01.1963, 31.01.1963 гг.), связанных с одним и тем же очагом глубиной $h=40 \text{ км}$. При этом оси напряжений-растяжения, как и напряжений-сжатия, ориентированы горизонтально, причем направления осей напряжений-растяжения образуют углы, близкие к прямым с простиранием полосы эпицентров. Очевидно, что ничего общего у этого механизма с механизмом поддвиг нет.

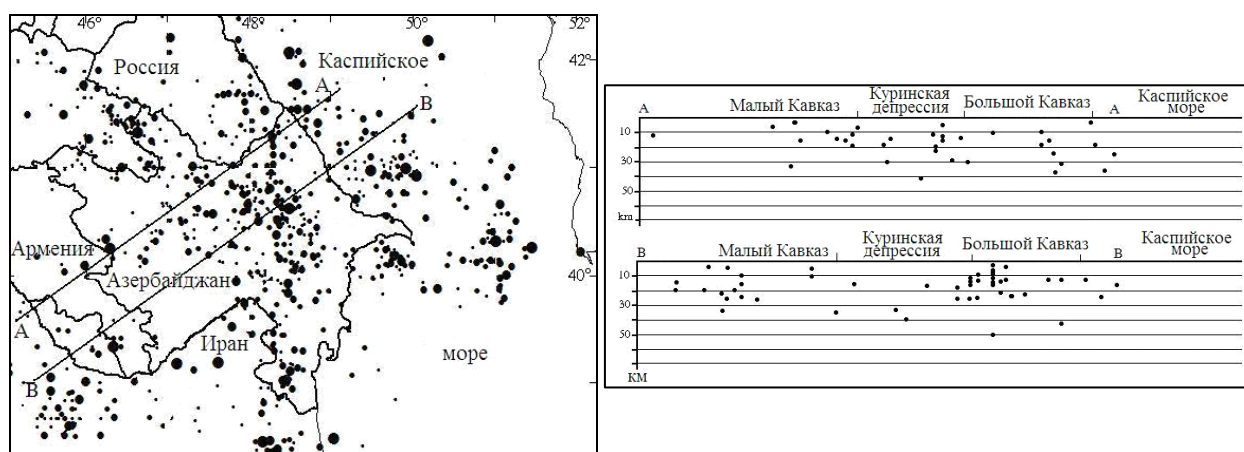


Рис. 5. Карта землетрясений Азербайджана (слева) и распределение очагов землетрясений по глубинам по профилям А-А и В-В (справа) (Panahi, 2006)

В публикациях Пристли с соавторами (Mangino, Priestley, 1998; Priestley et al., 2001) также обсуждались проблемы механизма землетрясений и условия коллизии Евразийской и Аравийской плит и, как следствие, возможность субдукции фундамента Южно-Каспийской впадины под Абшероно-Прибалханский порог. При этом четко отмечался дефицит сейсмологических данных для уверенного утверждения о субдукции в рассматриваемом регионе.

6. Заключение

Очаги землетрясений Кавказско-Каспийского региона имеют поверхностный характер, располагаются в пределах коры в широком интервале глубин от 7 до 50 км. Известны также очаги с промежуточными глубинами, связанные с верхами верхней мантии в пределах Северного Кавказа и среднего Каспия. Наблюдаемая связь подавляющего количества известных толчков с глубинами 10-20 км соответствует осадочному комплексу образований. Данный структурный комплекс земной коры сложен некомпетентными, пластическими толщами, где отсутствует возможность длительного накопления больших напряжений, а тектоническая активность выражается в быстрых современных геологических движениях (складкообразовании, сдвиговых и надвиговых деформациях), обусловленных внутренним перераспределением масс. Энергия деформации здесь высвобождается в форме большого числа слабых толчков, возникающих в активном ин-

тервале большой протяженности.

Слабая сейсмичность связана с малыми глубинами – приповерхностными разделами коры и обусловлена процессами фазовой и механической неустойчивости, проявляющейся в результате дефлюидизации, а также и формирования углеводородов в нефтегазоносных областях. Фазовые переходы в системах подземные воды – газы, твердые минералы – подземные воды, твердая фаза – газы приводят к возникновению возбужденных зон, которые проявляются на земной поверхности в виде слабых землетрясений высокой повторяемости и высокого уровня сейсмической активности.

Отсутствие глубокофокусных и промежуточных землетрясений не дает оснований для выявления сейсмофокальной плоскости в рассматриваемом регионе, и, как следствие, для утверждения о наличии активной зоны субдукции.

ЛИТЕРАТУРА

- АГАМИРЗОЕВ, Р.А. 1987. Сейсмотектоника Азербайджанской части Большого Кавказа. Элм. Баку.
 АГАЛАРОВА, А.Б. 1975. Детальное исследование напряженного состояния сейсмических областей Азербайджана. Канд. дисс. ИФЗ АН СССР. Москва. 15.
 Атлас землетрясений в СССР. Результаты наблюдений сети сейсмических станций 1911-1957 гг. 1962. Москва.
 Бюллетень телесеизмической сети СССР (1938-1939 гг.). 1938-1940. Изд-во АН СССР. Москва-Ленинград.
 Бюллетень сейсмических станций СССР за 1940. 1940. Изд-во АН СССР. Москва-Ленинград; 1941-1951. Изд-во АН СССР. Москва-Ленинград; 1946-1953; 1952-1961. Изд-во АН СССР. Москва. 1954-1964.

- Бюллетень сети сейсмических станций Кавказа за 1933-1937. 1938. Изд-во АН СССР. Москва-Ленинград; за 1958-1960 гг. 1961-1962. Мецниереба. Тбилиси; за 1971-1973 гг. 1973-1975. Тбилиси.
- ВАРДАПЕТАН, А.Н. 1979. Позднекайнозойская тектоника плит Черноморско-Каспийского региона, *Океанология*, XIX, 6, АН СССР, Москва, 1066-1074.
- ВВЕДЕНСКАЯ, Н.А. 1955. По поводу обобщения наблюдений стационарных сейсмических станций Средней Азии. *Труды Геофизического Института АН СССР*, 30 (157), 137-141.
- ГАДЖИЕВ, Р.М. 1965. Глубинное геологическое строение Азербайджана. Баку.
- ГОДЗИКОВСКАЯ, А.А. 1988. Мантийные землетрясения Кавказа в районе Терско-Сунженского прогиба. *Изв. АН СССР, Физика Земли*, 7, 102-106.
- ГОДЗИКОВСКАЯ, А.А. 2000. Каталог землетрясений Кавказа с $M \geq 4.0$ ($K \geq 11.0$) с древнейших времен по 2000 г.
- ГУЛИЕВ, И.С. 1997. Возбужденные геологические структуры и их роль в процессе динамики и формирования месторождений нефти и газа. Неотектоника и ее влияние на формирование месторождений нефти и газа. *Nafta-Press*. Баку.
- ГУЛИЕВ, И.С. 1999. Быстро протекающие геологические процессы: приложение к процессам формирования нефтегазовых залежей. Геодинамика Черноморско-Каспийского сегмента Альпийского складчатого пояса и перспективы поисков полезных ископаемых. *Nafta-Press*. Баку.
- ДЖИБЛАДЗЕ, Э.А. 1980. Энергия землетрясений, сейсмический режим и сейсмотектонические движения Кавказа. Мецниереба. Тбилиси.
- ДЖИБЛАДЗЕ, Э.А. 1983. О "глубоких" очагах землетрясений Кавказа. *Изв. АН СССР, Физика Земли*, 3, 22-33.
- ЗАХАРОВА, А.И. и ЯКОВЛЕВА, И.Б. 1975. Об изучении глубины очагов землетрясений Узбекистана и их связи с энергией землетрясений. Вопросы количественной оценки сейсмической опасности. Наука. Москва. 49-53.
- Землетрясения в СССР в 1962-1991 гг. 1964-1997. Наука. Москва.
- КАРАПЕТАН, Н.К. 1953. Динамические параметры очагов некоторых землетрясений Кавказа. *Изв. АН СССР, серия геофиз.*, 2, 260-268.
- КОНДОРСКАЯ, Н.В., УЛОМОВ В.И. 1993. Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии с древнейших времен до 1990 г. Система баз банков данных Н.Ц.РФФИ по наукам о Земле. Гос. Рег. №0229703356.
- КОНДОРСКАЯ, Н.В., ТУШКО, Т.А. 1993. Блоково-слоистая модель земной коры и определение гипоцентров землетрясений Каспийского моря. *Физика Земли*, 7, 17-23.
- КУЗНЕЦОВ, В.П. 1956. Об одной особенности Шамахинских очагов землетрясений, вызывающей несогласия в определении координат эпицентров. *ДАН Азерб. ССР*, XII, Баку, 611-615.
- КУЛИЕВ, Ф.Т. 1980. Уравнение макросейсмического поля для Азербайджана и его геоструктурных областей. *Сейсмологический бюллетень Кавказа, 1977*. Мецниереба, Тбилиси, 129-140.
- ЛЕБЕДЕВА, Т.М. 1958. Землетрясения на Кавказе с очагами под земной корой. *Тр. ИГ АН ГССР*, 17, 139-159.
- ЛЕВИН, Л.Э., СОЛОДИЛОВ, Л.Н., ПАНАХИ, Б.М. 2001. Каспийский регион: Дифференциация разрывных нарушений по уровню сейсмичности. Третьи Геофизические чтения. 22-24.02.2001. ГЕОН. Москва. 69-70.
- ЛЕВИЦКАЯ А.Я. 1949. Сейсмическая деятельность на Кавказе в 1947-1949 гг. Совещание по сейсмораионированию Баку и Апшеронского полуострова, 21-25 октября 1949 г., Баку, 49.
- МАХМУД-ЗАДЕ, Л.А. 1995. Исследование особенностей распределения очагов землетрясений Среднекуринской впадины. Автореф. канд. дис. 21 с.
- МИХАЛЕВСКИЙ, А.М. 1923. Определение глубин очагов кавказских землетрясений: Ахалкалакского 19 декабря 1899 г. и Горийского 20 февраля 1920 г. Баку, *Изв. АГУ, 1923/24 г.*, 3, 231-238.
- КОНДОРСКАЯ Н.В., ШЕБАЛИН Н.В. (под ред.). 1977. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. Наука. Москва. 536.
- ПАНАХИ, Б.М., КАСПАРОВ, В.А. 1988. Вопросы сейсмического режима территории Каспийского моря. *Изв. АН Азерб. ССР, сер. наук о земле*, 1, 91-98.
- ПОЛЯКОВА, Т.П. 1985. Сейсмичность центральной части Средиземноморского пояса. Наука. Москва.
- РИЗНИЧЕНКО, Ю.В. 1976. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. В кн.: *Исследования по физике землетрясений*. Наука. Москва. 9-26.
- РОГОЖИН, Е.А., РЕЙСНЕР, Г.И. 1988. Поперечная зональность восточной части Большого Кавказа. Вопросы инженерной сейсмологии. В кн.: *Исследования по сейсмической опасности*. АН СССР. Москва.
- Сейсмологический бюллетень сети сейсмологических станций СССР за 1962-1963. 1962-1963. Изд-во АН СССР. Москва; за 1964-1973 гг. 1965-1977. Наука. Москва.
- Сейсмологический бюллетень Кавказа за 1974-1984 гг. 1976-1989. Мецниереба. Тбилиси.
- ХАИН, В.Е., ЛОБКОВСКИЙ, Л.И. 1994. Условия проявления остаточной мантийной сейсмичности Альпийского пояса Евразии. *Геотектоника*, 3, 12-20.
- ХАЛИЛОВ Н.Ю., ХАЛИЛОВ Э.Н. 1989. Современная активность грязевых вулканов Азербайджана в связи с глубинным строением и геодинамическими процессами. Нефтегазоносность больших глубин и грязевой вулканизм. Тез. докладов. Баку. 173.
- ЦХАКАЯ, А.Д. 1962. О глубинах кавказских землетрясений. *Изв. АН СССР, серия геофиз.*, 5, 577-584.
- ШЕБАЛИН, Н.В. 1961. Балльность, магнитуда и глубина очага землетрясений. В кн.: *Землетрясения в СССР*. Москва. 126-138.
- ШЕБАЛИН, Н.В. 1971. Замечания о преобладающих периодах, спектре и очаге сильного землетрясения. В сб.: *Сейсмические исследования для строительства. Вопросы инженерной сейсмологии*. Наука. Москва. 14.
- ADAMIYA, Sh.A., SHAVISHVILI, I.D. 1979. The model of the Earth crust tectonic evolution of Caucasus and surrounding territories. *Geotectonics*, 1, 77-84.
- DEWEY, J., PITMAN, III W., RYAN, B., BONNIN, J.

1973. Plate tectonics and the evolution of the Alpine system. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 84, 10.
- GULIYEV, I.S., PANAHI, B.M. 2004. Geodynamics of the deep sedimentary basin of the Caspian Sea region: Paragenetic correlation of seismicity and mud volcanism. *Geo Marine Letters*. Publisher: Springer-Verlag, Vol. 24, 3, 169-177.
- MANGINO, S. and PRIESTLEY, K. 1998. The crustal structure of the southern Caspian region. *Geoph. J. Int.* 133, 630-648.
- McKENZIE, D. 1974. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 30, 2.
- PANAHI, B.M. 1988. Seismotectonic zonation of the Caspian Sea territory. ESK, XII, Gen. Ass., Sofia, 79-80.
- PANAHI, B.M. 2000. On spatial-time correlation of earthquakes and mud volcano eruptions and seismic regime of Azerbaijan – Caspian region. *Geophysics news in Azerbaijan*, Baku, 1, 26-29.
- PANAHI, B.M. 2004. Mud volcanism, geodynamics and seismicity of Azerbaijan and the Caspian Sea territory. *NATO Science Series*. Springer, 51, 89-104.
- PANAHI, B.M. 2006. Seismicity in Azerbaijan and adjacent Caspian Sea. Recent geodynamics, georisk and sustainable development in the Black Sea to Caspian Sea region. Editor: Professor Alik Ismail-Zadeh, *AIP Conference proceedings*, 825, 3-10
- PRIESTLEY, K, PATTON, H, and SCHULTZ, C. 2001. Modelling anomalous surface-wave propagation across the Southern Caspian Basin. *Bulletin of Seismological Society of America*, 91, 6: 1924-1929
- VARAZANASHVILI, O.Sh. 1999. Seismic hazard assessment of Georgia by deterministic and probabilistic methods. *Journal of Georgian Geophysical Society*, Issue (A), Solid Earth, 4, 35-45.
- WELLS, D. L. and COPPERSMITH, K. J. 1994. Updated empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84, 974-1002.

Рецензент: член-корр. НАН Азербайджана Ф.С.Ахмедбейли