

## ИСТОРИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗАГРОСА, ИРАН

Р.Э. ТАТЕВОСЯН, С.С. АРЕФЬЕВ, Н.Г. МОКРУШИНА

Объединенный институт физики Земли Российской академии наук, Москва

А.Э. ПЕТРОСЯН

Институт "Атомэнергoproект", Москва

Разработаны принципы составления однородного каталога ощутимых землетрясений на основе разнородных исходных макросейсмических данных. Они применены для создания каталога района Загроса (Иран), сейсмичность которого имеет большое значение для адекватного понимания характера коллизии Аравийской и Евразийской плит. Каталог представляет землетрясения с 840 по 1999 годы (155 событий). Показано отсутствие глубоких очагов в Высоком Загросе, что не подтверждает субдукционный характер взаимодействия плит на этом участке.

## HISTORICAL SEISMICITY OF ZAGROS, IRAN

R.E. TATEVOSSIAN, S.S. AREFIEV, N.G. MOKRUSHINA

United Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow

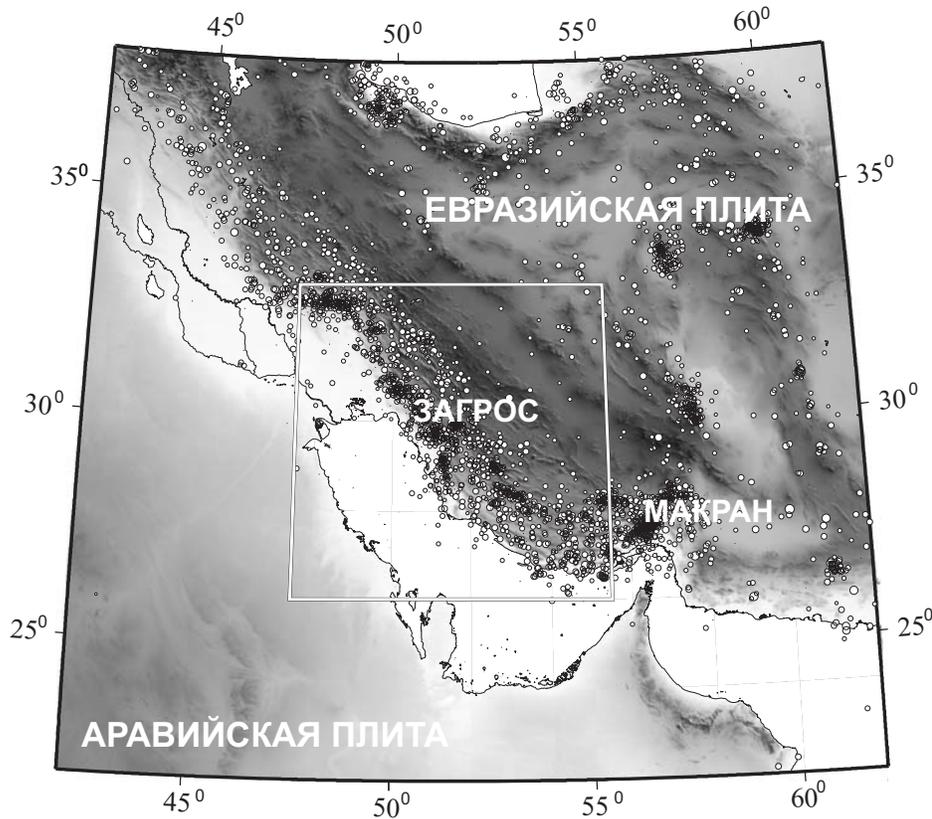
A.E. PETROSSIAN

Atomenergoproekt Institute, Moscow

Principles have been developed for producing a homogeneous catalog of felt earthquakes based on heterogeneous macroseismic data. These principles were applied to make a catalog for the Zagros region (Iran) whose seismicity is very important for a correct understanding of the collision between the Arabian and Eurasian plates. The catalog contains earthquakes for the period 840 A.D. to 1999 (155 events). It is shown that there have been no deep-focus earthquakes in High Zagros, which does not support subductional interaction between the plates in the area.

### Введение

Горная система Загроса, согласно концепции тектоники плит, лежит в зоне столкновения Аравийской и Евразийской плит (рис. 1) (см., например, [De Mets et al., 1990]). Для оценки характера этой коллизии принципиальное значение имеют глубины очагов землетрясений.



**Рис. 1.** Район исследования (в белой рамке) и основные тектонические единицы (из [Burne et al., 1992] с упрощениями).

Кружки – инструментально определенные эпицентры за 1964-1995 гг. по данным ISC (размер кружка пропорционален магнитуде)

Официальные инструментальные каталоги свидетельствуют о наличии относительно глубоких ( $H \geq 40$  км) очагов (ISC, NEIC): по данным каталога ISC 43% землетрясений в районе происходят на глубине свыше 40 км (10% – глубже 70 км). Они содержатся и в так называемом уточненном каталоге ISC [Engdahl et al., 1998] – там событий с  $H \geq 40$  км даже больше (53%), но несколько меньше событий с  $H \geq 70$  км (6%). Основываясь на этом факте, некоторые исследователи предполагают погружение (субдукцию) Аравийской плиты под Евразийскую (напр., [Nowroozi, 1971]). Если же глубокие (подкоровые) очаги – это артефакт, то, вероятнее, происходит столкновение континентального типа, как это имеет место на северной границе контакта Аравийской и Евразийской плит на Кавказе [Philip et al., 1989]. Для зоны Макран (см. рис. 1), лежащей на юго-восточном краю контакта плит, субдукционная модель подтверждается как пространственным распределением гипо-

центров, так и моделированием очагов землетрясений (включая очаг сильнейшего события 1945 г. с  $M = 8.1, H = 100$  км) [Yugne et al., 1992]. Проверка инструментальных определений глубин землетрясений Загроса методом моделирования волновых форм показала, что наличие глубоких очагов в каталоге – это результат ошибок, связанных с плохим азимутальным охватом района мировой телесеismicкой сетью и отсутствием полноценной региональной сейсмометрической сети [Baker et al., 1993]. Однако переопределение глубин очагов с помощью моделирования волновых форм возможно лишь для землетрясений, происшедших после начала развертывания мировой инструментальной сети, т.е. с 60-х годов XX столетия, причем качественные цифровые данные существуют только для последних 20 лет. Столь краткий промежуток времени не дает возможности адекватно оценить пространственное распределение сейсмичности. Поэтому полезны независимые определения глубин ощутимых землетрясений на основании макросейсмического эффекта. Использование макросейсмического материала существенно расширяет исследуемый период времени и, тем самым, значительно повышает достоверность выводов.

Глубины очагов имеют принципиальное значение не только для задач глобальной сейсмотектоники, но и для оценки сейсмической опасности. Наряду с магнитудой глубины очагов являются основными исходными данными, по которым определяются сейсмические воздействия. Для этой задачи также важна длительность каталога. Между тем полноценного долговременного параметрического каталога сильных ощутимых землетрясений для этого района пока не опубликовано. Например, наиболее авторитетная работа по сейсмичности Ирана (см. табл. 1, AM82) вообще не содержит определений глубин, магнитуды даны не для всех событий, а оценки интенсивности приведены в нестандартной макросейсмической шкале. Более поздняя публикация Берберяна (см. табл. 1, BER94) хотя и называется “Природная опасность и первый каталог землетрясений Ирана”, каталогом в полном смысле этого слова не является (параметризована лишь небольшая часть событий, причем набор параметров различается для разных событий). Такая ситуация сложилась не случайно, и трудности составления каталога ощутимых землетрясений Ирана вполне объективны. Несмотря на то, что прежде на это нигде явно не указывалось, макросейсмические шкалы, по сути, ориентированы на европейскую культуру и строительные традиции. Последняя по времени создания шкала интенсивности в своем названии явно отражает эту европейскую ориентацию [European macroseismic scale, 1998]. Поэтому составление долговременного параметрического каталога ощутимых землетрясений для района Загроса представляет большой интерес и для развития самой макросейсмологии.

Целью настоящей работы является создание для этой территории по возможности однородного каталога землетрясений (с некоторым стандартным набором параметров для каждого события) из разнородного исходного материала.

Рассмотрены все ощутимые землетрясения в пространственной рамке  $25.5^{\circ}$ – $32.5^{\circ}$  N и  $47.0^{\circ}$ – $55.0^{\circ}$  E без ограничения временного интервала и порога магнитуды. Выбор в качестве объекта исследования именно ощутимых землетрясений определяется тем, что это обеспечивает относительно высокую однородность каталога во времени при переходе через рубеж XX столетия, когда началась инструментальная регистрация землетрясений. Ведь для исторических землетрясений единственным критерием попадания события в каталог является именно его ощутимость (т.е. макросейсмический эффект). Только по этому параметру (а не по магнитуде) можно непосредственно сопоставлять исторические события с событиями периода инструментальной регистрации. Ощутимые события – это, как правило, землетрясения с достаточно высокой магнитудой. Опыт настоящей работы показывает, что для исследуемой области ощутимыми являются землетрясения, начиная с магнитуд порядка 5.0. Это события – значимые как для построения тектонических моделей, так и для оценки сейсмической опасности.

### **Исходные данные**

Составление макросейсмического каталога включает выбор источников информации, формирование исходного списка событий и выработку алгоритма параметризации землетрясений в зависимости от типа и полноты данных.

Поиск и отбор источников – это всегда компромисс между доступными ресурсами времени, наличием надежных описательных сводок или параметрических каталогов и целью, для которой создается каталог. Возможно, наиболее надежный способ составления каталога исторических землетрясений заключается в анализе описаний первоисточников и игнорировании существующих параметрических каталогов – такой подход требует колоссальных ресурсов времени, и практически не осуществим. Другая возможность – основываться на опубликованных параметрических каталогах. Это наиболее быстрый способ составления каталога, однако он чреват определенными негативными последствиями, поскольку при этом теряется связь между первичной описательной информацией и окончательными параметрами. Тем самым затрудняется понимание реальной точности параметризации отдельных землетрясений и ограничений каталога в целом.

В качестве компромиссного варианта мы решили сосредоточить поиск исходной информации среди класса источников, которые представляют собой коллекцию (сводки) описаний (цитат) из оригинальных исторических документов. Когда в процессе поиска встречаются первоисточники, они также включаются в базу данных. В табл. 1 представлены источники, которые были реально использованы при составлении каталога. Количество просмотренных публикаций, но не включенных в таблицу (поскольку это более поздние труды, лишь повторяющие сведения из ранних работ), в несколько раз больше.

Наиболее полной и последовательной публикацией, посвященной исторической сейсмичности Ирана, является работа Амбрейзиса и Мелвил (см. табл. 1, АМ82). Этот источник содержит описания макросейсмических эффектов с подробными ссылками на первоисточники (включая критический анализ этих первоисточников) и общего исторического контекста ситуации. Он стал нашим базовым источником информации. Другие опубликованные каталоги практически не представляют не учтенных в АМ82 исторических документов.

Во введении в публикации АМ82 приводится анализ истории Ирана, который позволяет понять полноту данных и, на этом основании, возможную точность окончательных оценок. Вместе с тем, параметры землетрясений из этого каталога не могут быть использованы непосредственно ни для оценки сейсмической опасности, ни для построения глобальных сеймотектонических моделей, поскольку:

- 1) интенсивность землетрясений оценивается в нем в соответствии с оригинальной нестандартной шкалой, разработанной авторами;
- 2) в нем отсутствуют определения глубин очагов (что характерно для всех опубликованных параметрических каталогов исторического периода этого района);
- 3) магнитуды приведены далеко не для всех событий, так что и по этому параметру каталог неоднороден.

Таким образом:

1. В качестве оптимального класса источников информации для составления исторического каталога землетрясений Загроса приняты сводки, представляющие выдержки описаний макросейсмических эффектов по первоисточникам и критический анализ их достоверности.

2. По интересующему нас району нет однородных параметрических каталогов с представлением полного набора параметров событий (включая глубину и магнитуду), которые могли быть перенесены в исторический каталог.

ТАБЛИЦА 1. Источники информации для составления списка землетрясений исторического каталога

Код	Источник
АС	<i>Ас-Суййути, Джалаал ад-Дин абд ар-Рахман.</i> Катф ас Салсала ан басф аз Залзала. (Трактат о землетрясениях). Русский перевод с арабского Э.М. Бунятова. Баку. 1983. 78 с.
BUN77	<i>Бунятов Э.М.</i> Сведения о землетрясениях в некоторых средневековых арабских источниках // Изв. АН АзССР. Серия наук о Земле. 1977. N 5. С.93–99.
AMB61	<i>Ambraseys N.N.</i> On the seismicity of south-west Asia. Data from a XV century Arabic manuscript // Rev. Etude Calamites, N 37. Geneva, 1961.
AMB79	<i>Ambraseys N.N.</i> A test case of historical seismicity: Isfahan and Chahar Mahal, Iran. // Geogr. J. 1979. Vol.145, N 1. P.56–71.
AM82	<i>Ambraseys N.N., Melville C.P.</i> A history of Persian earthquakes. Cambridge, 1982. 219 p.
AMT72	<i>Ambraseys N.N., Moinfar A.A., Tchalenko J.S.</i> Ghir earthquake of 10 April 1972. UNESCO, Serial N 2789/RMO.RD/SCE. Paris, 1972.
BER94	<i>Berberian M.</i> Natural hazards and the first earthquake catalog of Iran. V.1. Historical hazards in Iran prior to 1900. IIEES. 1994. 603 p.
BT76	<i>Berberian M., Tchalenko J.S.</i> Earthquake of the southern Zagros (Iran): Bushehr region // Contribution to the seismotectonics of Iran (Part II). Geological Survey of Iran, Report N 39, 1976. P.343–369.
BER77	<i>Berberian M.</i> Macroseismic epicenters of Iranian earthquakes // Contribution to the seismotectonics of Iran (Part III). 1977. P.79–101.
DG73	<i>Dewey J.W., Grantz A.</i> The Ghir earthquake of April 10, 1972 in the Zagros mountains of Southern Iran: seismotectonic aspects and some results of a field reconnaissance // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1973. Vol.63, N 6. P.2071–2090.
GN81	<i>Ganse R.A., Nelson J.B.</i> Catalog of significant earthquakes 2000 B.C.–1979. WDC-A, rep. SE-27. Boulder, 1981. 154 p.
HOF40	<i>Hoff K.E.</i> A Chronik der Erdbeben. (I). Gotha, 1840. 470 p.
JAR71	<i>Jarsi J.</i> Bishapur // Iran. J. British Inst. Persian Stud. Vol.IX, N 168. 1971.
MIL11	<i>Milne J.</i> A catalogue of destructive earthquakes A.D. 7 to A.D. 1899. London: 1911. 92 p.
MMM94	<i>Moinfar A., Mahdavian A., Maleke E.</i> Historical and instrumental earthquakes data collection of Iran. Iran Cultural Fairs Institute. 1994. 445 p.
NAB78	<i>Nabavi M.S.</i> Historical earthquakes in Iran c. 300 B.C.–1900 A.D. // J. Earth Space Phys., Inst. of Geoph. Tehran Univ. 1978. Vol.7, N 1. P.70–117.
PE65	<i>Perrey A.</i> Note sur les tremblements de terre en 1863 avec supplements pour les annees 1843-1862 // Mem. Cour. Bruxelles. 1865. Vol.17, N 5.
PT80	<i>Poirier J.P., Taher M.A.</i> Historical seismicity in the Near and Middle East, North Africa, and Spain from Arabic documents (VIIth–XVIIIth century) // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1980. Vol.70, N.6. P.2185–2201.
RL73	<i>Razani R., Lee K.L.</i> The engineering aspects of the Qir earthquake of 10 April 1972 in southern Iran. Nat. Acad. Sci. 1973. 144 p.
SAR69	<i>Sarfaraz A.A.</i> Bichapur, grande ville Sassanide // Bastan Shenassi va Honar-e-Iran, N 2. 1969.
SAR70	<i>Sarfaraz A.A.</i> Bishapur // Iran. J. British Inst. Persian Stud. 1971. Vol.VIII, N 178.
SAR87	<i>Sarfaraz A.A.</i> Bishapur / M.Y. Kiyani (ed.) Iranian cities, Vol.2. Ministry of Islamic Guidance Press, Tehran (in Persian). 1987. P.22–74.
SEJ72	<i>Sobouti M., Eshghi I., Javaheri J. H.</i> The Qir earthquake of 10 April 1972 // Earthq. Space Phys. 1972. Vol.1, N 2.
SIE32	<i>Sieberg A.</i> Erdbebengeographie // Handbuch der Geophys., B 1.4. 1932.
SIR83	<i>Sirjani S.</i> Vaqaye-e-Etefaqiyyeh // A collection of the British intelligence reports on southern Iran from 1291 to 1322 H. (In Persian). 1983.

## Параметризация событий

Выделим два типа параметров, основанных на макросейсмических данных. Первый тип включает параметры, которые определяются непосредственно из описания (первичные параметры): это *интенсивность* и *положение эпицентра*. Второй тип – это параметры, которые вычисляются на основании первичных с помощью некоторых корреляционных соотношений (вторичные параметры): это *глубина* и *магнитуда*. Специальных приемов требует параметризация ощутимых землетрясений, для которых имеются инструментальные записи. Для них магнитуда становится первичным параметром, вычисляемым непосредственно по сейсмограммам. Именно на этапе параметризации, часто воспринимаемом как вспомогательный, обычно возникают ошибки, которые ведут в дальнейшем к построению вполне логичных, но не обоснованных реальными данными, глобальных тектонических моделей. Поэтому подробное освещение алгоритма параметризации создаваемого каталога является принципиально важным.

### Интенсивность и положение эпицентра землетрясений до 1900 года

В основном источнике (AM82, табл.1) интенсивность приведена к оригинальной шкале классов. Поскольку во всех известных корреляционных соотношениях, связывающих интенсивность, магнитуду и глубину очага, интенсивность должна быть выражена в баллах “стандартной” 12-ти балльной шкалы (например, MSK-64), то необходимо найти соответствие классов интенсивностей из работы AM82 баллам макросейсмической шкалы. Введение локальной шкалы обосновывается авторами тем, что, наблюдая воздействия современных землетрясений, они обнаружили “удивительную легкость, с которой постройки в Иране повреждаются или разрушаются”. В то время, когда создавался каталог, не было макросейсмических шкал, в полной мере учитывающих проблему уязвимости конструкций, поэтому авторы и предложили оригинальную шкалу классов интенсивностей. Согласно AM82, вследствие высокой уязвимости строений, максимальная интенсивность любого разрушительного землетрясения в Иране кажется одинаковой, а именно – при интенсивности 8 баллов по шкале MSK-64 все дома из местного материала полностью разрушаются. Это своеобразный эффект насыщения, о котором надо помнить.

Ниже воспроизведена шкала классов интенсивностей из работы AM82:  
 $i = 1$ : Полное разрушение всех строений, включая общественные сооружения, большое число человеческих жертв, в том числе состоятельных граждан, полная потеря имущества и скота.

$i = 2$ : Все жилища разрушены, включая многие общественные здания, многочисленные жертвы, и частичная потеря имущества и скота.

$i = 3$ : Многие здания разрушены, есть жертвы.

$i = 4$ : Есть немногочисленные разрушения, трещины в общественных зданиях, жертв нет.

$i = 5$ : Землетрясение широко ощущается, местами вызывая страх и панику.

Классы интенсивностей в этой работе основаны на разрушительном воздействии землетрясения на местные сооружения (за исключением 5-го класса, который определяется по реакции людей). Самые слабые сотрясения (класс 5) соответствуют 6 баллам практически любой 12-ти балльной макросейсмической шкалы. Таким образом, нижнее значение интенсивности, которое может быть в принципе оценено по этому источнику – это 6 баллов. Из-за эффекта насыщения (вследствие плохого качества строительства) наивысшее значение интенсивности, которую мы можем различать в Загросе – это 8 баллов. Сразу видно определенное противоречие. Авторы AM82 называют предлагаемую ими шкалу классов “огрубленной” и “упрощенной”, хотя она состоит из девяти градаций (пять целых градаций и четыре промежуточных 1+, 2+, 3+, 4+). К тому же правило применения промежуточных градаций не задано. В то время, как в “стандартной” 12-ти балльной макросейсмической шкале (например, MSK-64 или EMS-98) тот же интервал эффектов представлен лишь тремя градациями (6, 7 и 8 баллов).

Интенсивность землетрясения обычно оценивают по реакции людей и по его воздействию на бытовые предметы, искусственные сооружения (дома) и земную поверхность. Перечисленные объекты включаются практически во все макросейсмические шкалы. Проблема оценки интенсивности на основании эффектов на земной поверхности широко обсуждалась в последние годы. В наиболее “свежей” макросейсмической шкале (EMS-98) этот объект исключен из конструкции основной части шкалы ввиду его ненадежности. В работе AM82 утверждается, что использование данных о сейсмогравитационных явлениях в Высоком Загросе может приводить к крайне неточным оценкам интенсивности: в экстремальных случаях оползни и камнепады могут наблюдаться уже при 4-х баллах шкалы MSK-64. Как правило, информация о поведении бытовых объектов в исторических документах Ирана не приводится, а о поведении людей сообщается лишь в редких случаях (паника в больших городах). Таким образом, при оценке интенсивности исторических землетрясений мы можем основываться только на разрушительном воздействии сотрясений на сооружения и, лишь в редких случаях, на реакции людей.

Итак, обнаруживается: а) существенное несоответствие числа градаций в сравниваемых шкалах; б) возможность использования для оценки интенсивности сотрясений практически только одного из проявлений макросейсмического эффекта. Отсюда следует, что переход от классов интенсивности к баллам макросейсмической шкалы – задача нетривиальная. Для ее решения, учитывая специфику данных, естественно использовать шкалу EMS-98, в которой в явном виде заложена концепция уязвимости объекта. Согласно [European . . . , 1998] пробное применение шкал EMS-98 и MSK-64 показало, что величина интенсивности в обеих шкалах численно совпадает. Разница заключается в методических особенностях применения шкалы EMS-98, которые обеспечивают большую объективность оценок балльности, выполненных в соответствии с ней.

Обобщая, приходим к заключению:

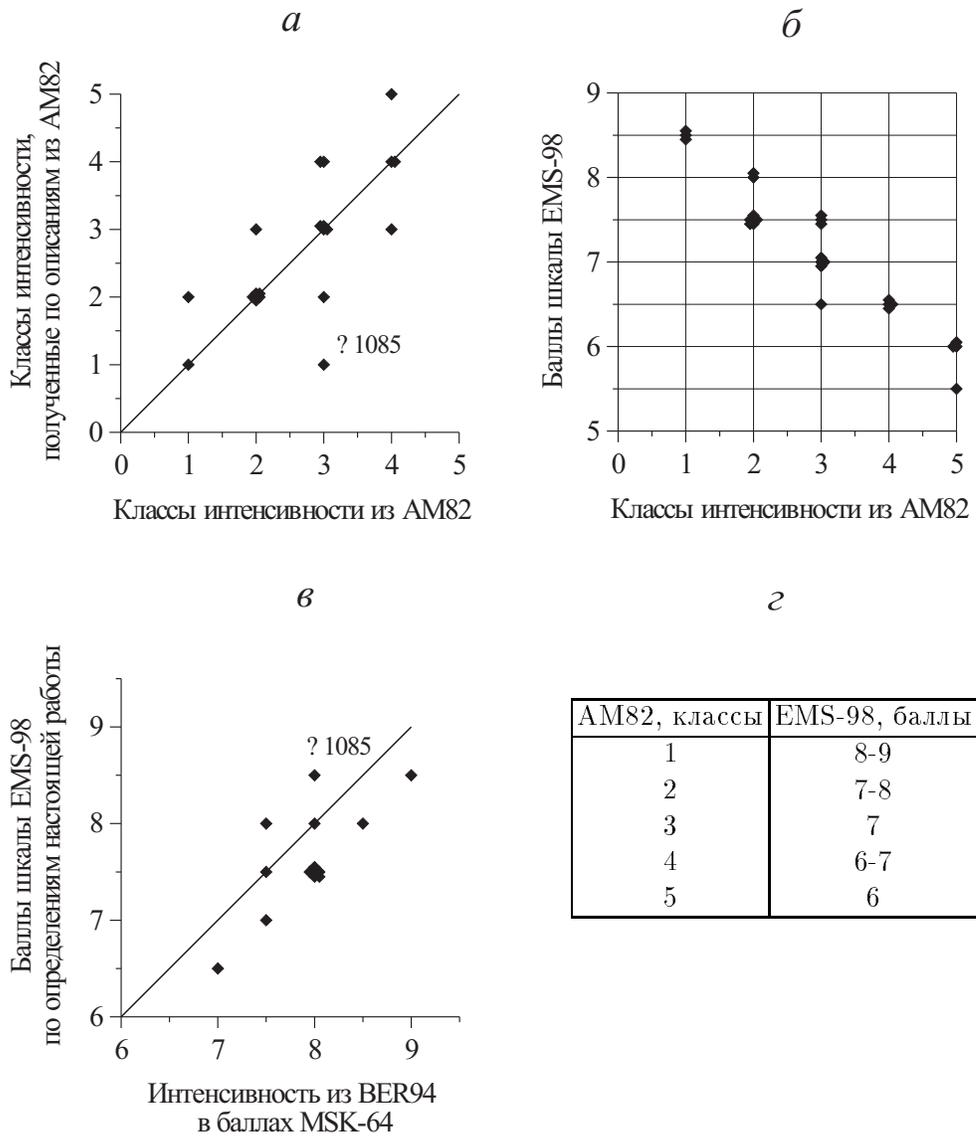
- для оценки интенсивности мы будем использовать шкалу EMS-98, как концептуально наиболее близкую к идеям, положенным в основу классификации, предложенной в AM82;
- будем определять балльность по оригинальным текстовым описаниям эффекта землетрясения; лишь в тех случаях, когда описательная информация недоступна – перевод классов интенсивности в баллы шкалы EMS-98 будет сделан на основании корреляционного соотношения.

Будучи последовательными, мы, принимая шкалу EMS-98, следуем ее предписанию не вводить “половинки” баллов. Таким образом, например, 5–6 баллов означает либо 5, либо 6 баллов, а не 5.5 балла.

Разработанное нами формальное правило перевода классов интенсивности AM82 в баллы шкалы EMS-98 состоит из следующих этапов.

1. Этап обучения. Для всех событий (всего 21), когда в AM82 приводились описания эффектов землетрясения, мы заново оценили классы интенсивности, используя их определения, данные выше (рис. 2, *а*). Этот шаг необходим, чтобы уяснить, насколько адекватно мы понимаем классификацию AM82 и ее приложение к реальным данным. Есть лишь одно значительное расхождение между двумя оценками (для события 1085 года), которое будет обсуждено ниже. В целом, сравнение подтверждает, что для оценки интенсивности событий мы вполне можем использовать описания из AM82.

2. Прямые оценки. Для тех же событий (21) по описаниям из AM82 была оценена интенсивность в баллах шкалы EMS-98 (рис. 2, *б*). Рис. 2, *б* в полной мере демонстрирует проблему, которую следовало ожидать из-за “перенасыщенности” шкалы классов интенсивности AM82: для некоторых классов наблюдается большой разброс в оценке интенсивностей. Наибольшие проблемы возникают при оценке 3-го класса. По соответ-



**Рис. 2.** Этапы выработки правил перевода классов интенсивности в баллы макросейсмической шкалы (на всех графиках совпадающие символы немного смещены относительно друг друга, чтобы показать количество случаев, представленных одной точкой). Для удобства сравнения показана линия с наклоном  $45^\circ$ :

*а* – классы интенсивности из AM82 и оценки классов по описаниям из того же источника, выполненные в настоящей работе. Отмечено событие 1085 года, требующее специального рассмотрения; *б* – классы интенсивности и оценка баллов макросейсмической шкалы EMS-98; *в* – сопоставление интенсивностей из настоящей работы с интенсивностями из BER94; *г* – переход от классов интенсивности из AM82 к баллам EMS-98

ствующим описаниям этим эффектам может быть приписана интенсивность от 6–7 до 7–8 баллов, с максимумом на 7 баллах. В целом же, согласие между двумя шкалами вполне удовлетворительное.

**3. Контрольные оценки.** Полученные оценки интенсивностей (EMS-98) сопоставлены с оценками из BER94, выполненными в шкале MSK-64 (рис. 2, 6). Из 21 события, для которых мы могли определить интенсивность непосредственно по описаниям эффекта, в каталоге BER94 обнаружено 14 землетрясений. Соотношение между двумя оценками является линейным, наши оценки систематически ниже, чем в BER94. Единственным исключением является землетрясение 1085 года (оно уже упоминалось и будет рассмотрено подробнее). В BER94 нет сведений, каким образом оценивалась интенсивность (использовалось ли как-то понятие об уязвимости объектов). Возможно, из-за игнорирования этого фактора оценки Берберяна в целом выше. Никакой коррекции из-за выявленного сдвига в наши оценки не вносилось.

Перевод классов из AM82 в баллы шкалы EMS-98 представлен на рис. 2, 2; его мы использовали лишь в случаях, когда единственная информация о землетрясении содержится в строке из параметрической части AM82. В таком случае точность не может считаться выше, чем  $\pm 1$  балл. Когда доступны исходные описания макросейсмического эффекта, то балльность должна быть оценена непосредственно по описаниям.

При определении положения эпицентра мы также следовали оригинальным описаниям. Если в описании приводился лишь один пункт, то в качестве положения эпицентра принимались координаты этого пункта (мы не смещали его в сторону горных хребтов или тектонических разломов, как это делается во многих каталогах).

### **Глубина и магнитуда исторических землетрясений до 1900 года**

Под глубиной землетрясения в настоящей работе понимается, так называемая, “макросейсмическая глубина”, которая соответствует центру излучения сейсмических волн в макросейсмическом диапазоне частот [Шебалин, 1974].

Для определения магнитуды и глубины необходимо зафиксировать параметры уравнения макросейсмического поля – оценить коэффициент затухания  $\nu$ . В интерпретации этого коэффициента есть два разных подхода. Одни полагают, что он отражает эффекты очага (сильно зависит от частотного состава, сброшенного напряжения, механизма и т.п.), и поэтому может значительно варьировать от события к событию в одном и том же регионе настолько значительно, что региональный

коэффициент просто лишен смысла. Другие исходят из того, что влияние на поглощение вышеуказанных причин пренебрежимо мало и поэтому  $\nu$  практически полностью определяется свойствами среды. Это означает, что коэффициент поглощения  $\nu$  может быть получен осреднением величин по набору из отдельных землетрясений региона. Следуя Н.В. Шебалину [Шебалин, 1961] мы будем исходить из второго подхода, и основываться на соотношении:

$$I_i = bM - \nu \log(h^2 + \Delta^2)^{1/2} + c,$$

где  $b, c$  – константы,  $\nu$  – коэффициент затухания,  $I_i$  – интенсивность  $i$ -й изосейсты,  $M$  – магнитуда.

Можно либо принять некое среднемировое значение коэффициента  $\nu$ , полученное по нескольким сотням коровых землетрясений (см., например, [Shebalin et al., 1974; Кондорская, Шебалин, 1977]), либо пытаться определить региональное соотношение между интенсивностью и расстоянием. Второй способ, в принципе, обеспечивает большую точность оценки интенсивности в зависимости от магнитуды, глубины и расстояния. При этом могут возникать трудности, так как из-за недостаточного объема исходных данных оценка коэффициента затухания становится очень неустойчивой.

Согласно [Shebalin et al., 1974] для надежного определения коэффициента затухания необходимо иметь как минимум 200 пар изосейст ( $\nu$  определяется по отношению радиусов изосейст  $r_{i+1}/r_i$ ).

Опорные землетрясения, которые могут быть включены в набор данных для оценки  $\nu$ , должны иметь независимую (инструментально определенную) оценку магнитуды. Точность определения магнитуды должна быть достаточно высокой, что на практике приводит к использованию данных с 1962 года. Только изосейсты, ограниченные пунктами с обеих сторон, могут считаться надежными и включаться в исходный набор для определения коэффициента  $\nu$ . Другое важное условие – землетрясение, для которого построена карта изосейст, должно быть либо представлено изолированным событием (только главный толчок), либо обследовано до возникновения разрушительного афтершока. Суммарный эффект от нескольких событий может приводить к большим ошибкам в оценке  $\nu$ . Должны быть исключены изосейсты, которые оконтуривают значительные участки локального усиления колебаний.

Оценим, позволяют ли имеющиеся данные определить региональный коэффициент затухания. Рассмотрение событий с 1900 года, для которых имеются карты изосейст (либо данные для их построения), показывает, что из 11 землетрясений для определения  $\nu$  пригодны только два (Гир, 10.04.72 и Мишан 02.07.72), имеющие по две уверенно проведенные

изосейсты 7 и 8 баллов. В девяти остальных случаях данные не пригодны либо из-за их низкого качества, либо из-за наличия кумулятивного эффекта, либо из-за сильных локальных эффектов. Данные явно недостаточны для надежного определения регионального коэффициента затухания в уравнении макросейсмического поля. Поэтому примем средние для кóровых очагов коэффициенты уравнения макросейсмического поля из [Кондорская, Шебалин, 1977]:  $b = 1.5$ ,  $\nu = 3.5$ ,  $c = 3.0$ .

Алгоритм практического применения уравнения макросейсмического поля зависит от полноты и качества данных. По этому критерию мы выделили три типа данных и, соответственно, применили три процедуры параметризации. Ниже они представлены в порядке убывания от наиболее надежных определений к менее надежным.

1. Есть возможность построения полноценной карты изосейст (эпицентральная область и информация из удаленных пунктов) – всего три случая. Тогда:

- строится карта и
- $M$  определяется по радиусу осязаемости<sup>1</sup>  $R_{\text{ощ}}$ ;
- $h_{IM}$  определяется по  $I_0$  и  $M$ ;
- $h_I$  определяется по радиусам изосейст в эпицентральной области (2–3 старшие изосейсты);
- $h = (h_{IM} + h_I)/2$ ;
- $\Delta h$  – вероятный интервал глубин задается от  $h_{IM}$  до  $h_I$  (либо от  $h_I$  до  $h_{IM}$ , если  $h_{IM} > h_I$ ).

2. Есть возможность оценить по описаниям только эпицентральную интенсивность (21 случай) при том, что для этих событий в АМ82 дана магнитуда, которая там определялась по радиусу осязаемости, т.е. независимо от  $I_0$ . Тогда:

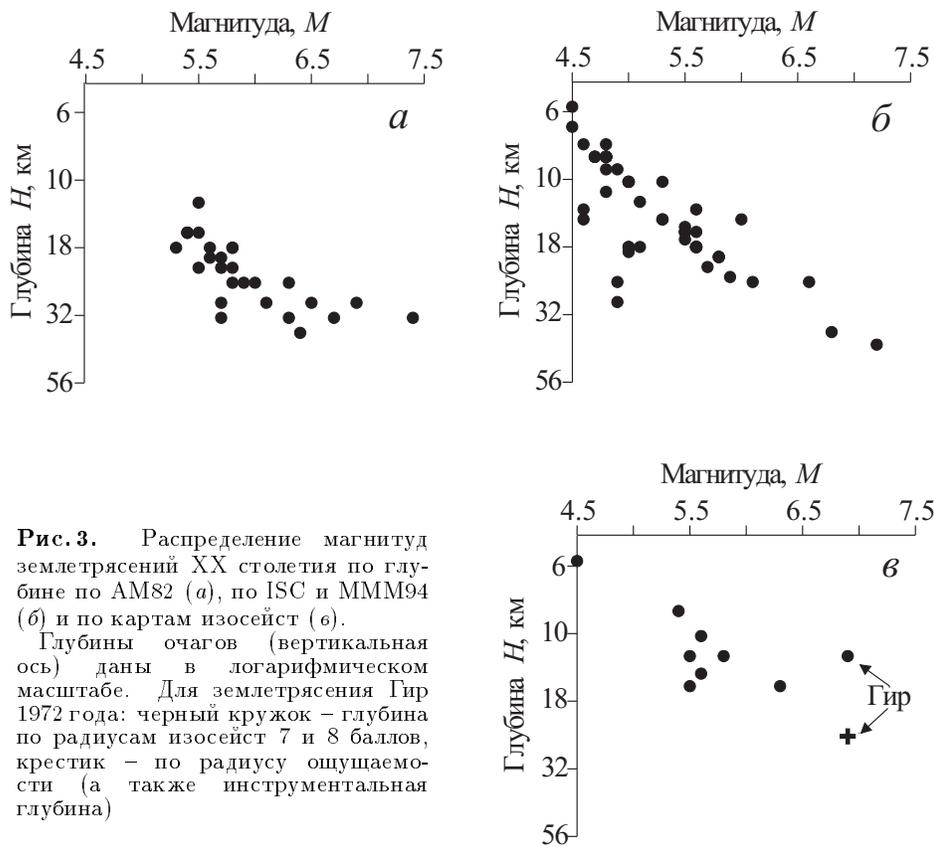
- $h_{IM}$  определяется по  $I_0$  и  $M$ ;
- $\Delta h$  – вероятный интервал глубин задается через фиксированную глубину  $h_{fix}$  (см. ниже).

3. Есть возможность оценить по описаниям только эпицентральную интенсивность (42 случая), при этом никакого независимого определения магнитуды нет. Тогда:

- $h_{fix}$  (см. ниже) и ее вероятные пределы ( $h_{fix} \pm \Delta h_{fix}$ ) используются для оценки магнитуды и ее возможных пределов по номограммам из [Кондорская, Шебалин, 1977]. Верхний порог магнитуд  $M$  для данной интенсивности  $I_0$  соответствует глубине гипоцентра  $h_{fix} + \Delta h_{fix}$ , а нижний – глубине  $h_{fix} - \Delta h_{fix}$ . Разумеется, точность  $M$  в таком случае низка.

<sup>1</sup>Во всех случаях применялись номограммы из [Кондорская, Шебалин, 1977]

Значения  $h_{fix}$  оценены по данным о глубинах событий XX столетия, исходя из предположения, что исторические землетрясения происходили в тех же интервалах глубин. На рис. 3, а–в даны распределения землетрясений инструментального периода по глубине и магнитуде (в одну “точку” на рис. 3, а–в могут попасть несколько событий). Данные из AM82 (27 событий) показаны отдельно от других источников (рис. 3, а). Классы из AM82 переведены в баллы шкалы EMS-98 на основании рис. 2, г. Глубина определялась по эпицентральной интенсивности и магнитуде (только инструментальной). Аналогичный график по каталогам ISC и MMM94 (59 событий) для района Загроса приведен на рис. 3, б. На рис. 3, в показаны наиболее точные данные (девять событий). Они соответствуют тому небольшому числу событий, для которых оказалось возможным определить глубину по картам изосейст.



Представленные графики распределения магнитуд землетрясений позволяют сделать следующие выводы о характере распределения магнитуд землетрясений по глубине:

1. Землетрясения с  $M \geq 5.5$  не происходят выше глубин 8–10 км. Отметим, что мощность осадочного чехла в Высоком Загросе составляет 8–10 км [Verberian, 1995].

2. Все события с магнитудой 6.2–6.4 и более происходят на глубинах более 25 км, но не глубже 35 км. Укажем, что по разным публикациям мощность коры в исследуемой области варьирует в пределах от 35 км до 40 км.

3. Наблюдается согласие между данными по хорошо изученным событиям (с картами изосейст) и всем набором данных (за исключением землетрясения Гир 1972 года – это событие специально обсуждается в разделе "Особые случаи").

Отмеченные выше закономерности используются для определения параметров почти 60% землетрясений до 1900 года, поэтому необходимо оценить их надежность. На рис.3, *a–в* показаны 95 точек; они представляют все известные землетрясения района в XX столетии, для которых имеются независимые определения  $M$  и  $I_0$ , (по ним и определялась глубина с применением номограммы). Что касается точности отдельных определений, то укажем, что в работе AM82 точность магнитуд никак не оценена, в ISC и MMM94 даны коды, поставленные в соответствие интервалам точностей. Судя по этим кодам, для периода времени с 1900 года по 1963 год (это приблизительно половина точек, представленных на рис.3) магнитуды определены с точностью  $\pm 0.3$ , после 1962 года – с точностью  $\pm (0.1 - 0.2)$ . Ошибка в определении глубины есть комбинация ошибок в определении  $M$  и  $I_0$  и ошибки корреляционного соотношения между ними. Причем, комбинируя, они могут как складываться, так и компенсировать друг друга. Например, переоценка  $M$  на 0.3 единицы и  $I_0$  на 1.0 почти не скажется на глубине (при заданной номограмме).

Поэтому строго формально оценить точность определения глубины невозможно, наша экспертная оценка точности для большинства случаев – не хуже 3–5 км. Исходя из этого, принято считать, что фиксированная глубина должна задаваться интервально – этот интервал не может быть меньше 8 км (он хотя бы в 1.5 раза должен превосходить среднюю ошибку в определении  $h$ ).

Поскольку маловероятно, что в исторических документах сохраняются сведения о слабых (с магнитудами менее 5.5) землетрясениях (за исключением каких-либо экзотических случаев), то при оценке фикси-

рованной глубины мы будем исходить из особенностей, отмеченных для событий с  $M \geq 5.5$ .

Формулируя правило выбора фиксированной глубины, мы исходили из указанных закономерностей и общего характера описания события:

1) ощущалось локально (упоминается лишь один пункт), интенсивность в эпицентре  $< 6-7$  баллов (умеренный эффект),  $h_{fix} = 15$  км, интервал  $h_{fix}$  в пределах 12–20 км;

2) ощущалось на большой площади, интенсивность в эпицентре  $\geq 6-7$  баллов,  $h_{fix} = 20$  км, интервал  $h_{fix}$  в пределах 15–30 км.

### **Параметризация землетрясений (1900 – 1999 гг.)**

Чтобы обеспечить однородность каталога, мы и в XX столетии рассматривали только ощутимые землетрясения.

Точность инструментальных определений координат эпицентра в исследуемом районе довольно низка. Ранние инструментальные определения могут содержать ошибки, иногда превышающие 100 км (таких величин достигает разница в координатах эпицентра в каталогах NEIC и ISC для некоторых событий), в среднем же это расхождение не меньше 15 км. Поэтому при определении эпицентра мы активно использовали макросейсмическую информацию.

В зависимости от качества и полноты данных параметры события определялись следующим образом:

а) время и магнитуда всегда инструментальные;

б) эпицентр всегда макросейсмический – в центре старшей изосейсты; если данных для построения карты изосейст не достаточно, то принимаются координаты пункта с  $I_{max}$ ;

в) эпицентральная интенсивность всегда  $I_0$ ; при наличии двух старших изосейст по их радиусам и номограмме из работы [Кондорская, Шебалин, 1977] проверяется возможность  $I_0 > I_{max}$ , в противном случае всегда принимается  $I_0 = I_{max}$ ;

г) глубина всегда макросейсмическая; если данные позволяют построить карту изосейст, то  $h$  определяется по отношению радиусов старших изосейст, в противном случае – по соотношению  $M$  и  $I_0$ .

### **Особые случаи**

Специального рассмотрения требуют два землетрясения.

#### Землетрясение 1085 года

Это событие представлено на рис. 2, *a*, где соответствующая ему точка, “выпадает”. В работе AM82 приводится следующее описание: “Арраджан и граничащие с ним области подверглись землетрясению,

вызвавшему многочисленные жертвы и разрушение мечети. Толпы людей и животных оказались погребены под обломками. Толчок ощущался в Хузистане и Фарсе”.

Этому событию в АМ82 приписан класс интенсивности 3, что находится в противоречии со шкалой классов. Разрушение общественного здания (мечети) указывает, как минимум, на 2-й класс. Возможно, в параметрическую часть АМ82 вкралась опечатка. Эпицентральную интенсивность мы оценили в  $8 \pm 1$  баллов, положение эпицентра – вблизи Арраджана, глубина фиксированная, соответствующий вероятный интервал магнитуд: 6.1–6.7. При классе интенсивности 2 и 8 баллах все противоречия снимаются.

#### Землетрясение Гир 10 апреля 1972 года

Это событие представлено на рис.3,6, где соответствующая ему точка, “выпадает”. Землетрясение с магнитудой  $M_s = 6.9$  полностью разрушило города Гир, Карзин и Афзар. Погибли около 5000 человек и 1700 получили ранения. Афтершоки ощущались в течение года. Распределения интенсивностей по пунктам приведены в табл.2 (по разным источникам и наша оценка) – воспроизведен лишь фрагмент рабочей таблицы (всего имеются данные по 129 пунктам), чтобы показать насколько разнородны исходные данные: имеются как оценки интенсивности, сделанные в разных нестандартных школах, так и описания различной полноты и надежности.

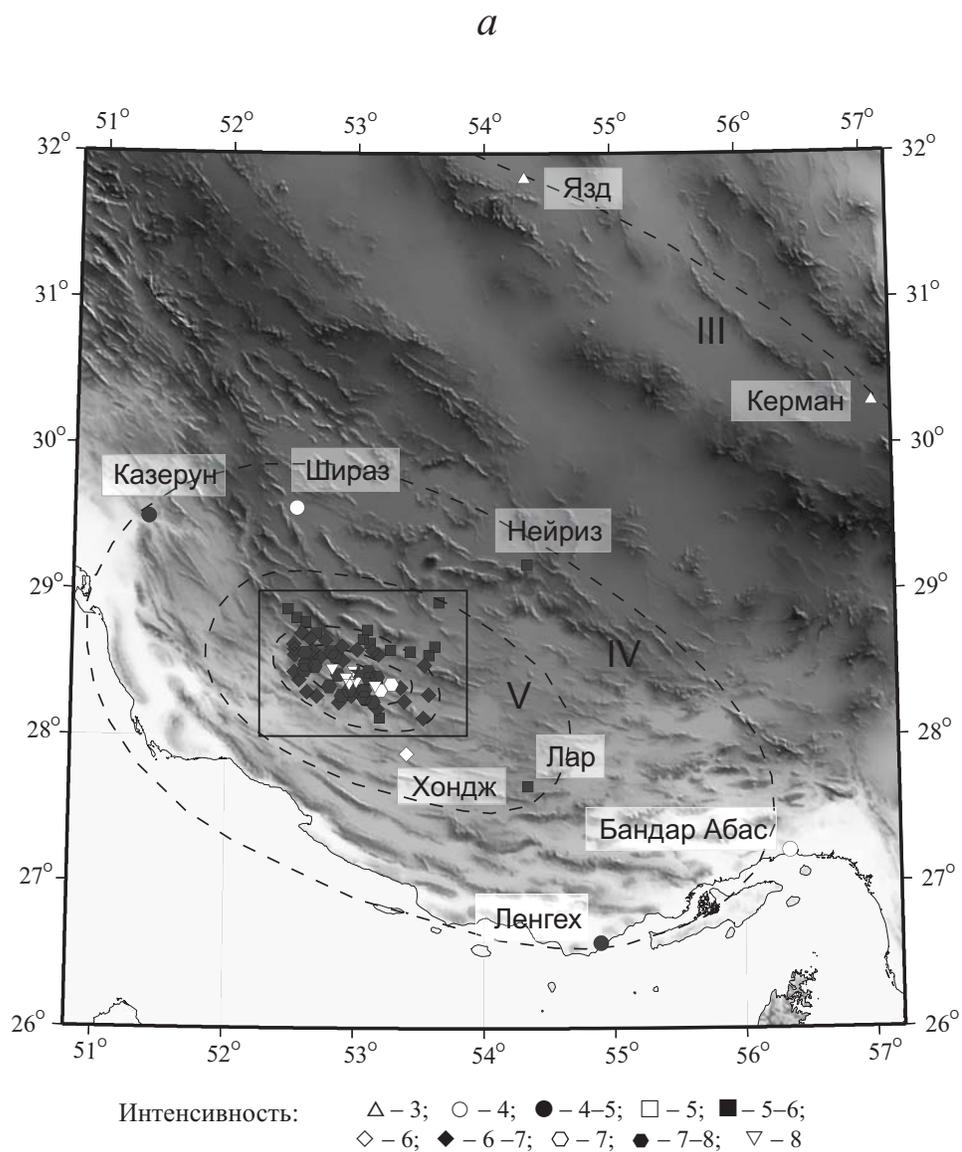
На рис.4, а, б показана построенная нами карта изосейст землетрясения. Надежно проведены только изосейсты VIII баллов ( $R_{\max} = 22$ ,  $R_{\min} = 9.5$  и  $R_{\text{ср}} = 14.5$  км) и VII баллов ( $R_{\max} = 47$ ,  $R_{\min} = 20.5$  и  $R_{\text{ср}} = 31$  км). Глубина очага, согласно радиусу старших изосейст, равна 12 км; инструментальная глубина, а также глубина по радиусу ощущаемости ( $R_{\text{ощ}} = 460$  км) – около 30 км. Вероятней всего, это можно объяснить вертикально протяженным очагом от 30 до 12 км (верхняя кромка очага обеспечивает интенсивные сотрясения, что приводит к большой балльности в эпицентре). Отметим, что следов выхода очага на поверхность обнаружено не было, что также свидетельствует об относительно большой глубине гипоцентра.

Таким образом глубина очага этого землетрясения вполне согласуется с общим характером распределения магнитуд по глубине, обнаруживаемого по всей совокупности данных.

ТАБЛИЦА 2. Пункты-баллы из разных источников и наша оценка интенсивности землетрясения Гир 10 апреля 1972 года

N	Пункт	Баллы					Наша оценка
		Источник					
		DG73	AM82	RL73	AMT72	SEJ72	
1	Аб Араг (Рикан)	A	3		+		6
2	Аб Дзуе (Аб Дузуе)	A	4		+		6
3	Аб Секу (Абсакун)		2	+	+		6
4	Аб Ширин		4		+		6
5	Аб-Абад (Аб Бад)			+	+		8
6	Абе-Бидак	C	2	+	+		7
7	Абеченару (Аб Ченару)			+	+		6-7
8	Абеде (Беде, Биде)	E	2	+	+		8
9	Абе-Морди (Аб Мурди)	C	2	+	+		7
10	Аб-и Гарм (Аб Гарм)	D	2	+	+		7-8
11	Абуаскар (Абу Аскар)		2	+	+		7
12	Агун (Аган, Ахан)	A	4		+		5-6
13	Алибад	D	2	+	+		7
14	Алибад-Бахман			+	+		7-8
15	Араб Фатабад	A	4		+		6
16	Ардашир (ок. Фирузабада)		+				5-6
17	Азизабад			+	+	8.5	7-8
18	Бабанаджм (Баба Наджим)	C	3	+	+		6-7
19	Багенау (ок. Хингама)		4	+	+		7
20	Баг-е Нау	D	2	+	+		8
21	Балеглу		4	+	+		6
22	Бандар Аббас		+		+		4
23	Баррес	C	3		+		6-7
24	Бериджан (Барихун)		1	+	+		8
25	Беркехаби (Берге-Аби)	A	4	+	+		6-7
26	Биан (Баян)	E	1	+	+	8.5	8
27	Биби Зохре	A	4		+		5-6
28	Чар-чар (Чер-Чер)		3	+	+		6-7
29	Даштешур		2	+	+		7-8
30	Дех-Бех	D	2	+	+	8.5	7-8
31	Дехуйе	A	4		+		5-6
32	Дейме Сорх		3		+		6
33	Дотулагаз			+	+		7-8

*Примечание.* А, С, D, E – оценки интенсивности из DG73, сделанные в собственной нестандартной шкале; знак “+” означает, что в источнике приведено описание макросейсмического эффекта



**Рис. 4.** Общая карта изосейст землетрясения Гир 1972 года (*a*) и эпицентральной области (*b*) – на рис. *a* обведена рамкой

Звездочка – положение эпицентра, цифры на карте соответствуют номерам населенных пунктов из табл. 2



## Каталог ощутимых землетрясений

Целью настоящей работы является как создание методики составления долговременного однородного каталога ощутимых землетрясений из разнородного исходного материала, так и самого каталога. Прежде, чем представить каталог (в виде карты эпицентров), обсудим точность параметризации отдельных событий, однородность каталога в целом и проверим соотношение  $M - I_0$ .

### Оценка точности параметризации землетрясений

Оценка точности макросейсмических определений – это экспертная оценка. При этом особенностью долговременных макросейсмических каталогов землетрясений является то, что точность определения параметров землетрясений сильно меняется от события к событию, в целом возрастая к современным.

По точности и полноте наш каталог естественно делится на три временных интервала: период до XIX века, XIX век и XX век. Для каждого землетрясения проводился анализ, подобный событию 1085 года. Этот пример дает определенное представление о качестве каталога в целом.

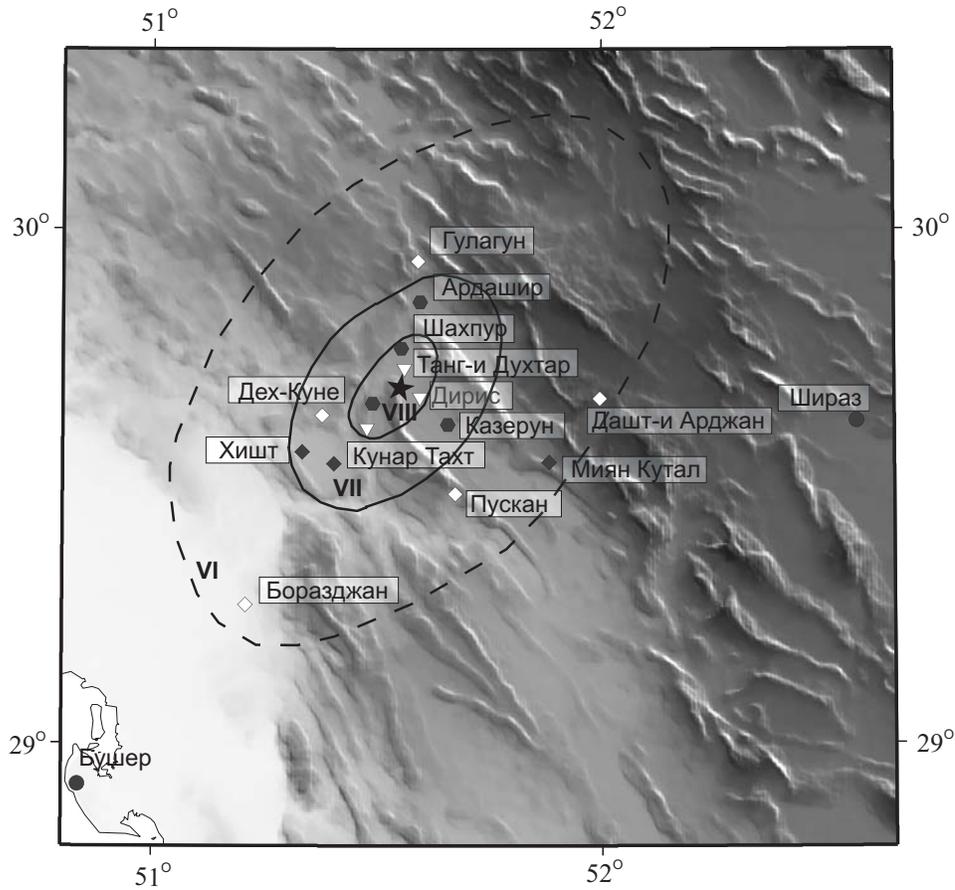
Событие 1085 года типично по объему и характеру исходных данных до XIX столетия. В этот интервал времени каталог включает 21 событие. Имеющихся данных не достаточно для построения по ним полноценной карты изосейст. На наш взгляд, это не позволяет оценить точность локации эпицентра в этот период выше, чем  $0.2-0.5^\circ$  по широте и долготе. Для 19 из 21 события интенсивность определена по описаниям; точность оценки  $\pm 0.5 \pm 1.0$  балл. Для двух событий (из-за отсутствия описаний) использовалось правило перевода, приведенное на рис. 2, г, точность оценки интенсивности  $\pm 1$  балл.

Для XIX века ситуация меняется. Оказывается возможным построить три карты изосейст. Рассмотрим эти события, поскольку они дают представление о верхнем пороге точности определения параметров землетрясений для этого периода. Отметим, что для этого интервала времени точность параметризации гораздо менее однородна, потому что в каталог включено много более слабых событий (5–6 баллов), чем для предыдущего интервала времени (7 баллов, редко 6). Естественно, что по слабым событиям информация весьма скудная, что отражается на точности параметризации.

Только для трех землетрясений XIX века полнота описаний позволяет построить карты изосейст, они приведены на рис. 5–7.

Землетрясение 2 июня 1824 года (рис. 5)

Источник информации – AM82. Более менее уверенно можно провести только изосейсты VIII баллов ( $R_{\max} = 12$ ,  $R_{\min} = 7$ ;  $R_{\text{ср}} = 9$  км) и VII баллов ( $R_{\max} = 30$ ,  $R_{\min} = 17$ ;  $R_{\text{ср}} = 23$  км) баллов. Параметры землетрясения:  $I_0 = 8 \pm 0.5$ ,  $M_S = 6.0 \pm 0.3$ ,  $h = 12(6 - 24)$  км.



**Рис. 5.** Карта изосейст землетрясения 2 июня 1824 года (обозначения, как на рис. 4, а)

## Землетрясение 25 июня 1824 года (рис. 6)

Источник информации – АМ82. Достаточно надежно оконтуривается только изосейста VII баллов ( $R_{\max} = 29$ ,  $R_{\min} = 15$ ,  $R_{\text{ср}} = 21$  км). Параметры землетрясения:  $I_0 = 8 \pm 0.5$ ,  $M_S = 6.0 \pm 0.3$ ,  $h = 10(5-20)$  км.

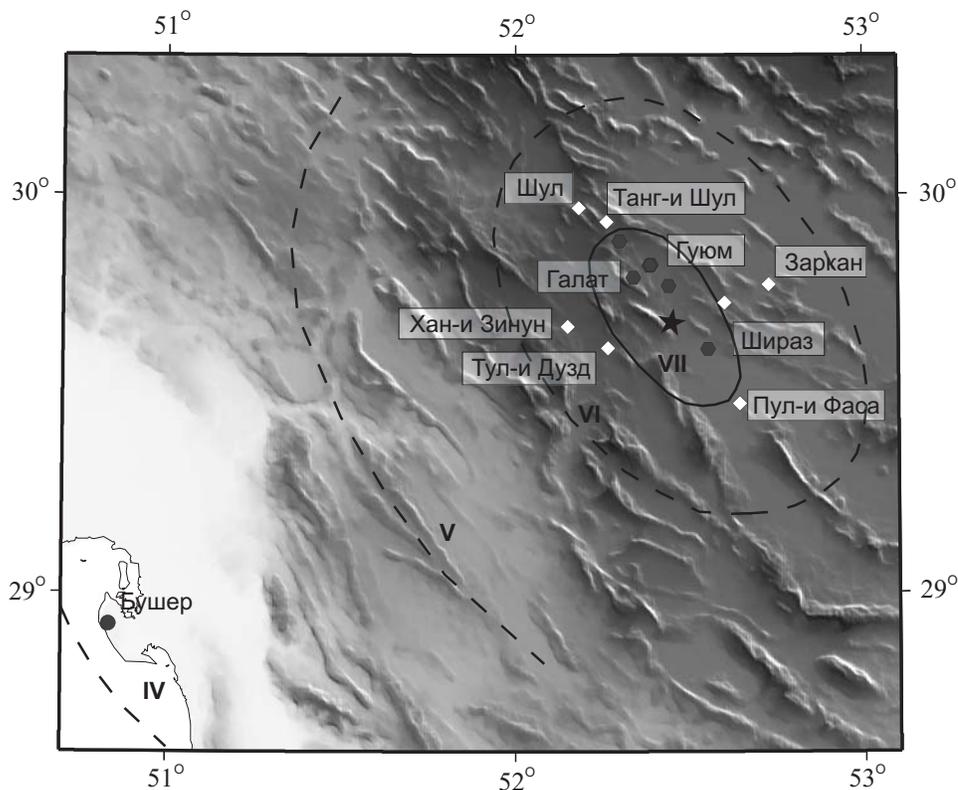
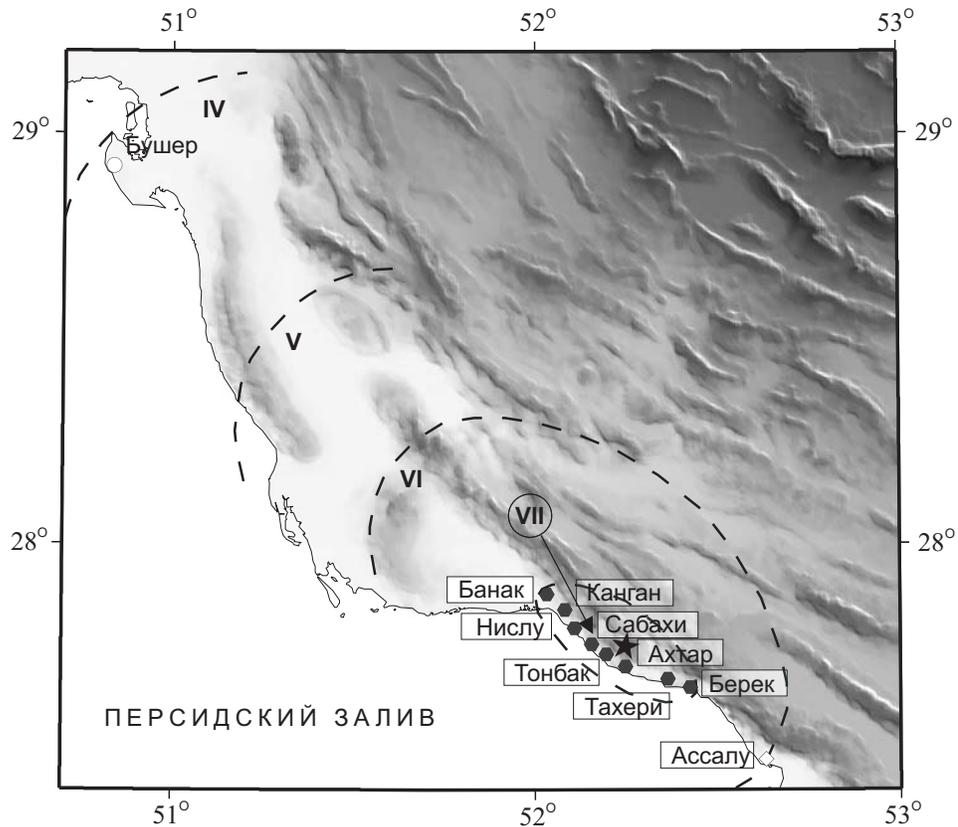


Рис. 6. Карта изосейст землетрясения 25 июня 1824 года (обозначения, как на рис. 4, а)

## Землетрясение 16 октября 1883 года (рис. 7)

Источники информации – НАВ77 и ВТ76. Пространственное распределение пунктов крайне невыгодное, что и определяет неуверенность в проведении изосейст. Кроме восьми пунктов в эпицентральной зоне, мы фактически можем опираться еще только на один пункт, по которому оцениваем радиус ощущаемости. Из размеров VII-балльной изосейсты ( $R_{\max} = 24$ ,  $R_{\min} = 10$ ,  $R_{\text{ср}} = 15$  км) и радиуса ощущаемости (190 км) получаем параметры землетрясения:  $I_0 = 7-8 \pm 0.5$ ,  $M_S = 6.1 \pm 0.5$ ,  $h = 18(10-30)$  км.



**Рис. 7.** Карта изосейст землетрясения 16 октября 1883 года (обозначения, как на рис. 4, а)

Точность параметризации сильных событий XX века иллюстрирует рассмотренное выше землетрясение Гир 1972 года. Для более слабых событий начала XX века информация, разумеется, не столь полна, но зато добавляются инструментальные магнитуды. Это уменьшает число неизвестных, которые требуется определить по макросейсмическим данным, за счет чего также растет точность оценок.

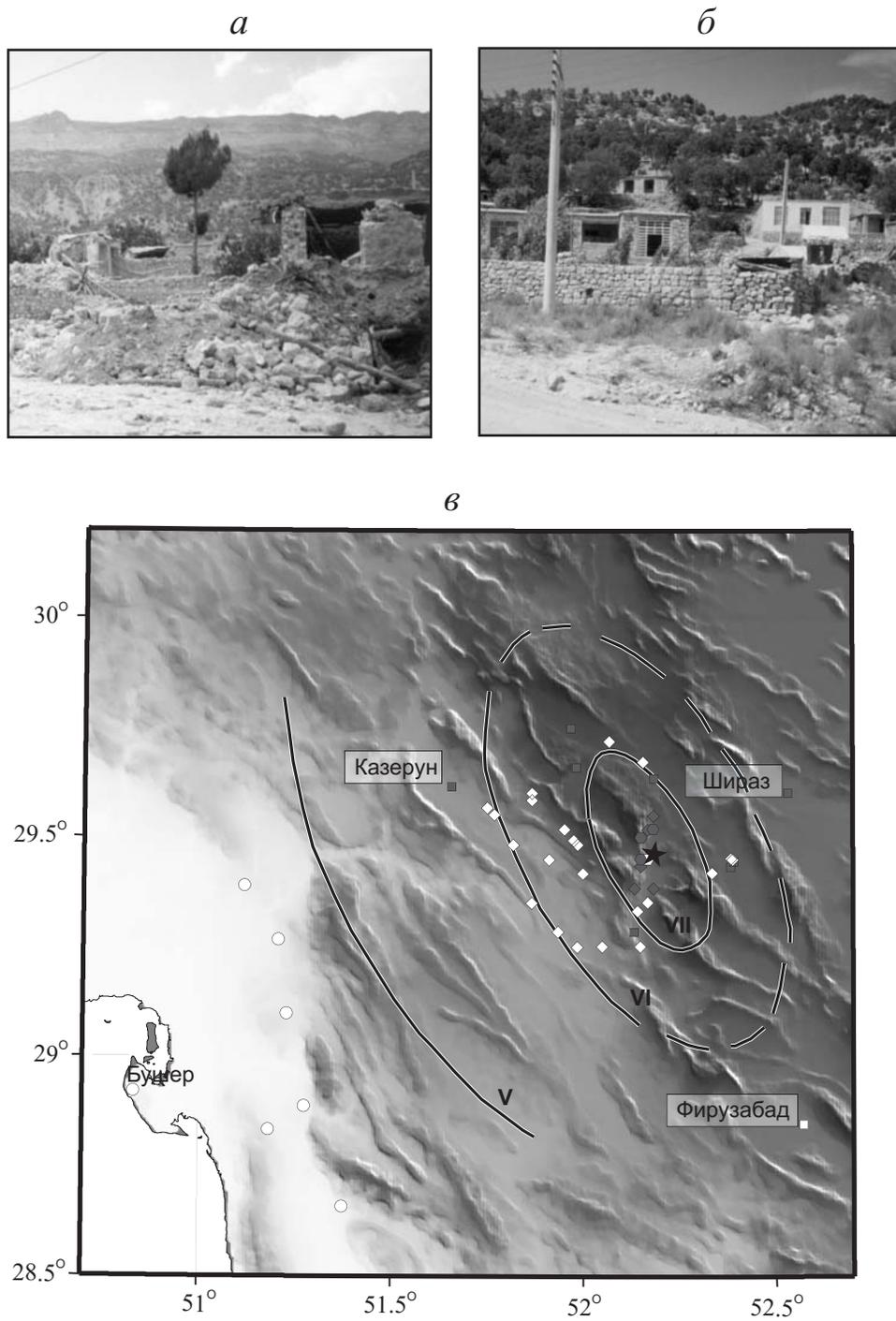
Еще один важный параметр каталога – его полнота. В целом этот вопрос также решается экспертно. В частности, грубой оценкой полноты исторического каталога Н.В. Шебалин [Шебалин и др., 1995] предлагал считать дату, на которую приходится середина каталога (по числу событий). Для исторической части нашего каталога его середина соответствует 1824 году, и можно полагать, что ощутимые толчки в этом каталоге представительны с 20-х годов XIX века. С этого времени исходные данные настолько полноценны, что по ним уже оказывается возможным строить карты изосейст для некоторых землетрясений.

### Оценка однородности каталога

Консерватизм традиционных строительных технологий является принципиальным вопросом для оценки однородности каталога. Ведь если технология массового строительства существенным образом менялась во времени, то разрушительные эффекты древних и современных событий становятся несопоставимыми. Это особенно актуально для исследуемой территории, поскольку почти все наши оценки интенсивности исторических землетрясений сделаны именно на основании разрушительного эффекта, так как информация о поведении людей и реакции предметов, составляющих основу для определения интенсивности относительно слабых событий ( $I \leq 6$ ), практически не сохранилась.

В связи с обсуждением этого вопроса представим материалы макросейсмического обследования современного землетрясения, происшедшего в Высоком Загросе 6 мая 1999 года ( $M_S = 6.3$ ). Эпицентральная область землетрясения лежит в 40 км юго-западнее г. Шираз. На рис. 8 представлены фотографии, снятые в одном и том же населенном пункте Каре Бас на расстоянии всего несколько десятков метров друг от друга. На рис. 8, *a* показан практически полностью разрушенный дом. Он, как и все остальные дома в центральной части деревни, построен в соответствии с традиционными технологиями: кладка стен составлена из крупного рваного местного камня, скрепленного глиной и грязью; крыша чрезвычайно тяжелая – на деревянные балки положен настил, покрытый толстым слоем земли. На рис. 8, *б* показан новый участок деревни: в строительстве использован цемент, крыша с бетонным перекрытием, хотя никаких специальных антисейсмических мер не применено. Все дома новой постройки получили неконструктивные повреждения. Совершенно очевидна высокая уязвимость домов, построенных в соответствии с традиционной технологией, что отмечалось многими исследователями – здесь это подтверждено документально. Во время макросейсмического обследования мы посетили 21 населенный пункт. Во всех имеются дома, построенные в соответствии с традиционной технологией, во многих местах – это преобладающий тип конструкций. В этом смысле вполне сопоставимы описания разрушительных эффектов исторических и современных событий.

На рис. 8, *в* представлена карта изосейст землетрясения Каре Бас. Максимальная наблюдаемая интенсивность VII–VIII баллов. Оценка интенсивности в эпицентре VIII баллов основана на максимально наблюдаемой интенсивности и на отношении средних радиусов изосейст VII и VI баллов. Выход разрыва в очаге на поверхность не обнаружен.

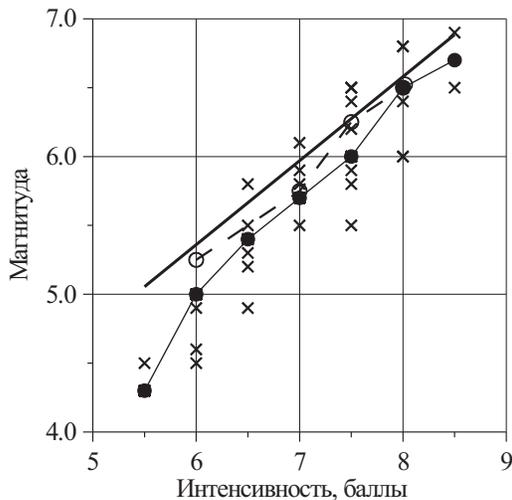


**Рис. 8.** Землетрясение 6 мая 1999 года: разрушительный эффект в старой части поселка Каре Бас (*а*), в новой его части (*б*) и карта изосейст землетрясения (*в*). Обозначения, как на рис. 4, *а*

Если принять во внимание неопределенность в проведении изосейсты V баллов и не учитывать ее при параметризации, то средняя глубина гипоцентра, определенная по радиусам изосейст, равна 12 км, а определенная по  $I_0$  и  $M$  равна 16 км. В качестве окончательной оценки мы принимаем глубину, равную 14 км (вероятный диапазон 11–17 км).

### Проверка соотношения $M - I_0$

Составляя каталог ощутимых землетрясений, мы разработали и применили сложные многоступенчатые процедуры и приняли ряд допущений. Чтобы убедиться в том, что в итоге не получен абсурдный результат, для контроля рассмотрим соотношение между нашими оценками эпицентральной интенсивности землетрясений и инструментальными магнитудами (рис. 9).



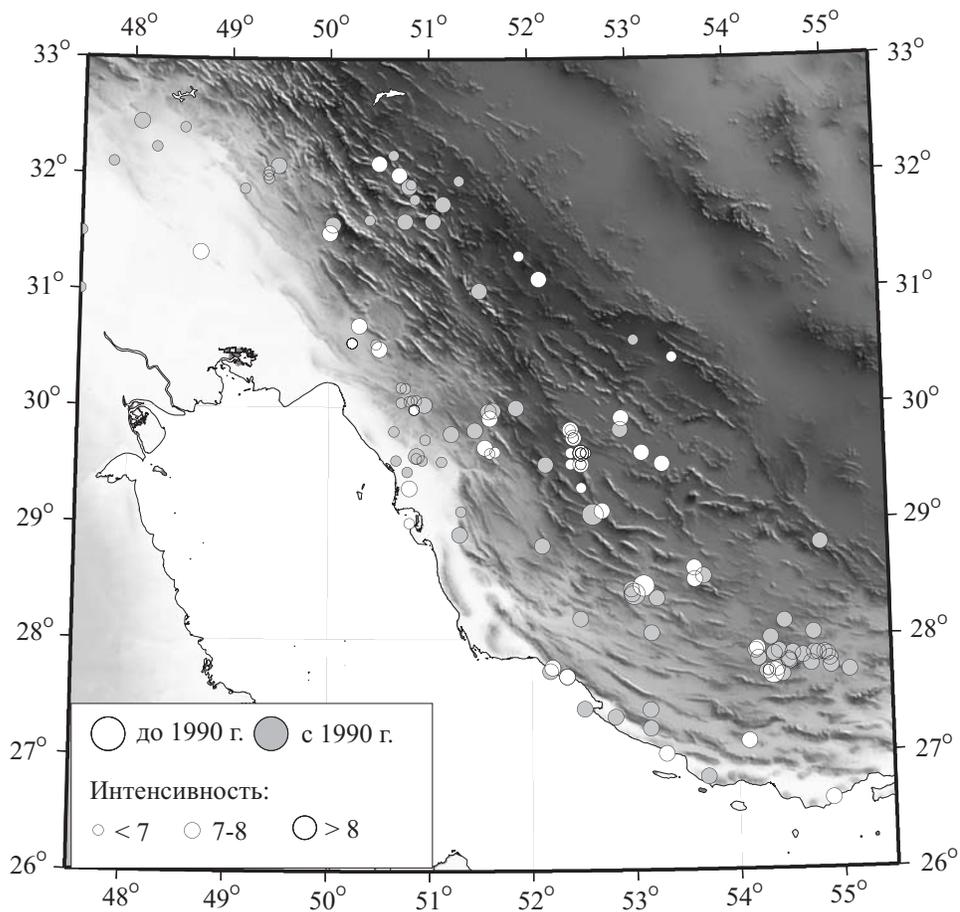
**Рис. 9.** Соотношение между интенсивностью и магнитудой

Черные кружки — медианы интенсивностей (соединены сплошной тонкой линией), светлые — медианы магнитуд (соединены штриховой линией). Для сравнения показано соотношение между магнитудой и интенсивностью для Ирана в целом из [Moha jer-Ashjai, Nowroozi, 1978] (жирная линия)

В интервале интенсивностей от 6 до 8 баллов и магнитуд 5 – 6.5 линии медиан близки, что свидетельствует о надежности корреляции между магнитудой и балльностью. Магнитуды более слабых событий оцениваются менее надежно. Наши оценки дают более высокую зависимость  $I(M)$ , особенно для малых магнитуд по сравнению с функцией  $I(M)$  для Ирана в целом из работы [Moha jer-Ashjai, Nowroozi, 1978]. Это либо результат того, что мы допускаем существование меньших глубин очагов, либо это отражает объективные отличия соотношения ( $M - I$ ) в Загросе от Ирана в целом.

### Карта эпицентров – каталог ощутимых землетрясений

В составленном нами каталоге 155 ощутимых землетрясений, они показаны на рис. 10. Нет ни одного события с глубиной, превышающей мощность коры в Загросе (более 40 км). До 1900 года в каталоге нет событий с интенсивностью менее 5–6 баллов, для XX столетия включены и более слабые события ( $I_0 = 4 - 5$  балла). Распределение глубин очагов землетрясений в Загросе не подтверждает субдукционный характер взаимодействия Аравийской и Евразийской плит на этом участке.



**Рис. 10.** Карта эпицентров, построенная по составленному в настоящей работе каталогу

Светлые кружки – события до 1900 г.; темные – события с 1900 г. по 1999 г.; размер кружка проградуйрован по эпицентральной интенсивности

Определенным контролем качества каталога ощутимых землетрясений является то, что как в историческое, так и в инструментальное (с 1900 г.) время активными являются практически одни и те же участки региона. Исключение составляет совокупность эпицентров исторических землетрясений в районе г. Шираз: нельзя исключить, что это – артефакт. Напомним, что г. Шираз долгое время был столицей государства, поэтому землетрясение, ощущавшееся в городе, было гораздо более важным социальным событием, чем аналогичное явление в небольшой деревушке. Кроме того, в столицу стекалась информация обо всех достойных внимания событиях из очень большой окрестности, к ним можно отнести и сообщения об ощутимых землетрясениях. Далее, в исторических документах опускались названия окрестных небольших городков и деревень, а толчки стали ассоциироваться непосредственно со столицей. Действовал своеобразный “административный” фильтр.

### Обсуждение

В макросейсмических оценках высока роль субъективного фактора. Время от времени делались попытки разработать более формализованные и объективные методы (например, [Gasperini et al., 1999; Tosi et al., 1995 и др.]), но принципиально ситуация не менялась – все они работают эффективно только с “хорошими” данными (много точек наблюдений, равномерное азимутальное окружение). Поэтому почти все известные макросейсмические каталоги экспертные (авторские), и степень доверия к ним со стороны сейсмологической общественности определяется научным авторитетом составителей. К сожалению, это не всегда отражает реальную степень надежности каталога. Представляется крайне важным давать четкое и ясное описание всех алгоритмов, способов и подходов, с помощью которых получен результат. Тем самым обеспечивается их воспроизводимость, а, значит, уменьшается субъективность, присущая экспертным оценкам. На важность этого обстоятельства указывал Н.В. Шебалин<sup>2</sup>, и сегодня эту позицию разделяют многие специалисты. Например, в европейском проекте Basic European Earthquake Catalogue and a Database for evaluation of long-term seismicity and seismic hazard (BEECD), запущенном в 1995 году, было введено понятие “transparent procedures” (прозрачные процедуры). Но осуществить это на практике крайне трудно, поэтому почти нет каталогов, сопровождающихся исчерпывающим описанием методики составления. Так

---

<sup>2</sup>переписка с координатором проекта BEECD (1994 г.). Архив лаб. ОИ-25 ОИФЗ РАН

в рамках проекта ВЕЕСД была собрана огромная база данных (одних только первоисточников она насчитывает свыше тысячи), проведен их детальный критический анализ, но в итоге каталог до сих пор так и не создан [Stucchi et al., 2001].

Методика составления долговременного каталога землетрясений, охватывающего доинструментальный и инструментальный периоды, на основе разнородных исходных данных является одним из основных результатов данной работы. Разработанный нами алгоритм составления параметрического каталога землетрясений Загроса может быть применен и к другим сейсмоактивным районам. Важной составляющей методики является выбор класса источников информации, на основании которых предполагается построить каталог. Недопустимо ограничивать исходные данные только параметрическими каталогами – в таком случае практически невозможно обнаружить имеющиеся в них ошибки. Необходимо классифицировать типы исходных данных по полноте описания макросейсмической информации и определить правила, по которым будут обрабатываться те или иные типы. Все оценки интенсивности колебаний должны быть приведены в единой шкале. Правило перевода, которое при этом применяется, должно быть обосновано и ясно описано. Необходимо показать, хотя бы на отдельных примерах, наиболее типичные ситуации с исходными данными и способы принятия соответствующих им решений. Это дает достаточно адекватное представление о точности каталогов.

Каталог ощутимых землетрясений Загроса однороден в смысле использования единой методики при его составлении и дает значения основных параметров с оценками ошибок их определения. Карта эпицентров, построенная по этому каталогу, показывает те же основные черты пространственного распределения сейсмичности, что и данные инструментальных наблюдений последних 30 лет, приведенные на рис. 1.

Оценка глубин землетрясений в составленном каталоге – один из наиболее важных результатов. Макросейсмические методы оценки глубины гипоцентра вполне объективно соперничают с инструментальными методами, когда плотности наблюдательных сетей невелики. У нас не получено ни одного глубокого (больше 40 км) ощутимого землетрясения в Загросе. Этот результат представляется значимым и важным. Отметим, что он подтверждается специальным исследованием землетрясений из района Казеруна методом инверсии объемных волн, зарегистрированных мировой сетью сейсмических станций (см. [Baker et al., 1993]).

Таким образом, можно считать установленным факт отсутствия глубоких землетрясений в районе Загроса и, следовательно, коллизия плит здесь происходит не по субдукционному сценарию.

### Выводы

1. Разработаны принципы составления однородного каталога ощутимых землетрясений на основе разнородных исходных макросейсмических данных, которые применены для района Загроса в Иране.

2. Составлен долговременный каталог 155 ощутимых землетрясений за период с 840 по 1999 год.

3. На основе долговременного каталога ощутимых землетрясений показано отсутствие глубоких очагов в Высоком Загросе, что не подтверждает субдукционный характер взаимодействия Аравийской и Евразийской плит на этом участке.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 02-05-64894), а также Россия–НАТО (грант 978401).

Авторы выражают искреннюю признательность неизвестному рецензенту за ряд ценных замечаний.

### ЛИТЕРАТУРА<sup>3</sup>

1. Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. (ред.) Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 506 с.
2. Шебалин Н.В. Балльность, магнитуда и глубина очага землетрясений // Землетрясения в СССР. 1961. С.126–138.
3. Шебалин Н.В. Атлас очагов сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1974. 53 с.
4. Шебалин Н.В., Татевосян Р.Э., Мокрушина Н.Г., Петросян А.Э. Сейсмический режим и макросейсмология // Детальное сейсмическое районирование территории Ставропольского края. 1995. 127 с.
5. Baker C., Jackson J.A., Priestley K.F. Earthquakes on the kazerun line in the Zagros mountains of Iran: strike-slip faulting within a fold-and-thrust belt // Geophys. J. Inter. 1993. Vol. 115. P.41–61.
6. Berberian M. Master “blind” thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics // Tectonophysics. 1995. Vol.241. P.193–224.
7. Byrne D., Sykes L., Davis D. Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone // J. Geophys. Res. 1992. B1, Vol.97. P.449–478.

<sup>3</sup>Источники информации, на основании которых составлен каталог землетрясений, приведены в табл. 1

8. *De Mets C., Gordon D.F., Stein S.* Current plate motions // *Geoph. J. Inter.* 1990. Vol.101. P.425–478.
9. *Engdahl E., van der Hilst R., Buland R.* Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1998. Vol.88, N 3. P.722–743.
10. European Macroseismic Scale. G.Grunthal (ed). *Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie.* Luxembourg. 1998. Vol.15.
11. *Gasperini P., Bernardini F., Valensise G., Boschi E.* Defining seismogenic sources from historical earthquake felt report // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1999. Vol.89, N 1. P.94–110.
12. *Mohajer-Ashjai A.H., Nowroozi A.A.* Observed and probable intensity zoning of Iran // *Tectonophysics.* 1978. Vol.49. P.149–160.
13. *Nowroozi A.* Seismo-tectonics of the Persian plateau, Eastern Turkey, Caucasus, and Hindu-Kush region // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* Vol.61, N 2. P.317–341.
14. *Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A.* The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision // *Tectonophysics.* 1989. Vol.161. P.1–21.
15. *Shebalin N.V., Karnik V., Hadzievski D.* Catalogue of earthquakes of the Balkan region. Vol.I. UNDP-UNESCO Survey of the seismicity of the Balkan region. Skopje. 1974. 600 p.
16. *Stucchi M., Albin P., Camassi R., Musson R.M.W., Tatevossian R.* Main results of the project BEECD “A Basic European Earthquake Catalogue and a Database for the evaluation of long-term seismicity and seismic hazard” // *Seismic risk in the European Union.* Brussels–Luxembourg. 2001. Vol.III.
17. *Tosi P., De Rubeis V., Gasparini C.* An analytic method for separating local from regional effects on macroseismic intensity // *Ann. Geofiz.* 1995. Vol.XXXVIII, N 1. P.55–65.