

РАСЧЕТ ТЕНЗОРА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОМЕНТА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ АЗЕРБАЙДЖАНА ЗА ПЕРИОД 2012—2015 гг.

Г.Дж. Етирмишли, С.Э. Казымова, И.Э. Казымов

*Национальная академия наук Азербайджана, Республиканский центр сейсмологической службы,
Az 1001, Баку, ул. Гусейн Джавида, 123, Азербайджан*

Представлен метод расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений Азербайджана за период 2012—2015 гг. на основе широкополосных записей (ВН) современных цифровых станций и произведен статистический анализ полученных решений.

На основе составленной схемы главных элементов разрывной тектоники изучаемого региона проведена корреляция землетрясений с активными разломами. Построена схематическая карта ориентации осей тензора сейсмического момента сильных землетрясений. Анализ ориентации осей сжатия (P) показал СЗ-ЮВ ориентацию в Закапальском районе, С-Ю в Шекинском и далее, плавно меняясь по часовой стрелке к СВ-ЮЗ направлению, в Каспийском море. Ось растяжения (T) в основном ориентирована в СВ-ЮЗ и С-Ю направлениях, что связано с зоной погружения Куринской впадины под зону Большого Кавказа.

Сейсмология, землетрясения, оси сжатия и напряжения, Азербайджан.

SEISMIC-MOMENT TENSOR OF EARTHQUAKES IN AZERBAIJAN FOR 2012–2015

G.J. Yetirmishli, S.E. Kazimova, and I.E. Kazimov

Seismic-moment tensor solutions for earthquakes in Azerbaijan for 2012–2015 have been calculated with a new method by full waveform inversion of broadband data from modern digital seismic stations and processed statistically. The results are used to model main faulting elements in the region, to correlate the seismicity and fault patterns, and to compile a map of fault plane orientations for large events. The principal compression stress (P) directions are NW to SE in the Zaqatala area and N–S in the Shaki area but then gradually change clockwise toward NE–SW in the Caspian Sea. The directions of principal extension are mainly NE–SW and N–S within the zone where the Kura basin is subsiding beneath the Great Caucasus.

Seismology, earthquakes, compression and extension stress axes, Azerbaijan

ВВЕДЕНИЕ

Механизм очага землетрясения является одним из важнейших параметров, характеризующих сейсмическое событие. В современной сейсмологии очаг связан с внезапной подвижкой горных пород, сопровождающейся излучением сейсмических волн по поверхности ослабленной прочности, и отражает одновременно пространственную ориентацию осей главных напряжений (P и T), возможных плоскостей разрывов и подвижек в очаге землетрясения и представляет едва ли не основную часть информации о напряженном состоянии земных недр [Мельникова, Радзиминович, 1999]. Именно данные о полях напряжений и деформаций совместно с геологическим, структурно-тектоническим строением позволяют решать задачу создания моделей деформационных процессов тектонических структур земной коры [Сычева, 2004].

Первые данные о напряженном состоянии Большого Кавказа были приведены в работах О.Д. Годцадзе и Е.И. Широковой (1952—1959 гг.). Изучение современного напряженно-деформированного состояния на основе массового изучения фокальных механизмов очагов землетрясения на территории республики было начато во второй половине 1960-х годов — А.В. Введенской, Л.М. Балакиной, Л.А. Мишариной, А.В. и Н.В. Солоненко и др. Далее определением механизма очагов землетрясений в Азербайджане занималась Э.Б. Агаларова (1963—1993 гг.) и С.Т. Агаева (1978—2007 гг.).

На современном этапе плотная сеть высокочувствительных цифровых сейсмических станций в количестве 35, позволяющая регистрировать все сейсмические события с магнитудой $M > 0.1$ в пределах Азербайджана, позволила получить новые данные по механизмам очагов землетрясений, что дало

возможность более детально изучить закономерности современного деформационного процесса в литосфере Азербайджана.

Актуальность изучения напряженно-деформированного состояния земной коры необходима для решения практических задач, например, оценка сейсмической опасности промышленных и гражданских сооружений, разработка и эксплуатация крупных месторождений полезных ископаемых, таких как нефть и газ.

Целью данного исследования является расчет тензора сейсмического момента сильных землетрясений Азербайджана за период 2012—2015 гг. на основе широкополосных записей (ВН) современных цифровых станций с применением вновь разработанных алгоритмов и программных продуктов.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РЕГИОНА

Территория Азербайджана расположена на востоке Кавказского сегмента Альпийской геосинклинальной области. С востока к Азербайджану примыкает огромная меридиональная депрессия Каспийского моря. Северная часть Азербайджана охватывает восточный отрезок сложнопостроенного южного крыла мегантиклинория Большого Кавказа, а также область его юго-восточного погружения. Центральная часть Азербайджана относится к области Куринской межгорной впадины, характеризующейся накоплением мощной толщи неогеново-антропогеновых моласс. Эти отложения в полосе к югу от продольной Алазань-Агричайской депрессии смяты в крутые, отчасти надвинутые к югу складки, а в пределах Кура-Араксинской низменности образуют пологие брахиантиклинальные поднятия [Хаин, Ализаде, 2005].

В глобальном тектоническом отношении исследуемая территория охватывает три крупных геоблока центральной части Крымско-Кавказско-Копетдагской Альпийской складчатой системы: блок Деште-Лут, расположенный на востоке Ирана, Среднекаспийско-Туранская плита — на восточном побережье Среднего Каспия и Главный Загросский надвиг — на юго-западе Ирана. В окружении этих крупных геоблоков находятся основные геоструктурные элементы Азербайджана [Асланов, 2009].

Как известно, землетрясение представляет собой механический процесс разрушения среды, обусловленный резким разрывом и смещением напряженных пород по разлому, возникающему близ поверхности Земли. При анализе механизма очага землетрясений важную роль играет выбор карты тектонических нарушений.

Таким образом, на основании работ [Шихалибеги, 1996; Кенгерли, 2007; Рзаев и др., 2013] нами была составлена схема элементов разрывной тектоники изучаемого региона, используемая в данной статье.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕНЗОРА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОМЕНТА И ПОДГОТОВКА РЕАЛЬНЫХ СЕЙСМОГРАММ

В данной работе применялся алгоритм по методу инверсии волновых форм — Time-Domain Moment Tensor INVerseCode (TDMT INVC) [Dreger, 2002]. Основным источником сейсмограмм — Республиканский Центр сейсмологической службы. Сейсмограммы скачиваются в SEED формате и преобразуются в SAC формат. Широкополосные сейсмограммы отбирают с соблюдением ограничения по расстоянию (70—350 км). Они должны иметь достаточную длительность (входит интервал от P -волн до S -волн) и качество (достаточно высокое отношение сигнал/шум, отсутствие клиппирования). Подготовка сейсмограмм для инверсии включает: снятие вступления P -волны; деконволюцию (восстановление истинных смещений грунта); определение эпицентрального расстояния, прямого и обратного азимутов; расчет радиальной и поперечной компонент; фильтрацию. Деконволюция производится во временной области. Для полосовой фильтрации применяется фильтр Баттерворта 4-го порядка (рис. 1).

В ходе работы скрипта после считывания файлов параметров, координат станций и выходных файлов программы локации производятся следующие операции: 1) коррекция волновых форм землетрясения за амплитудно-частотную характеристику регистрирующих приборов и переход от координат север—юг, восток—запад, вертикаль к координатам радиальная, тангенциальная, вертикальная; 2) полосовая фильтрация фильтром Баттерворта 4-го порядка; 3) вычисление функций Грина, используемых в инверсии синтетических волновых форм, для всего набора глубин и расстояний источник—приемник (полученных на основе программы локации подсистемы реального времени); 4) преобразование компонент функций Грина в частотной области в представление функций Грина во временной области с помощью обратного преобразования Фурье; в результате для заданного набора расстояний создаются файлы с записями компонент функций Грина; 5) полосовая фильтрация функций Грина фильтром Баттерворта 4-го порядка; 6) инверсия и расчет тензора и M_w при помощи программы TDMT (рис. 2) [Кушнир и др., 2010].

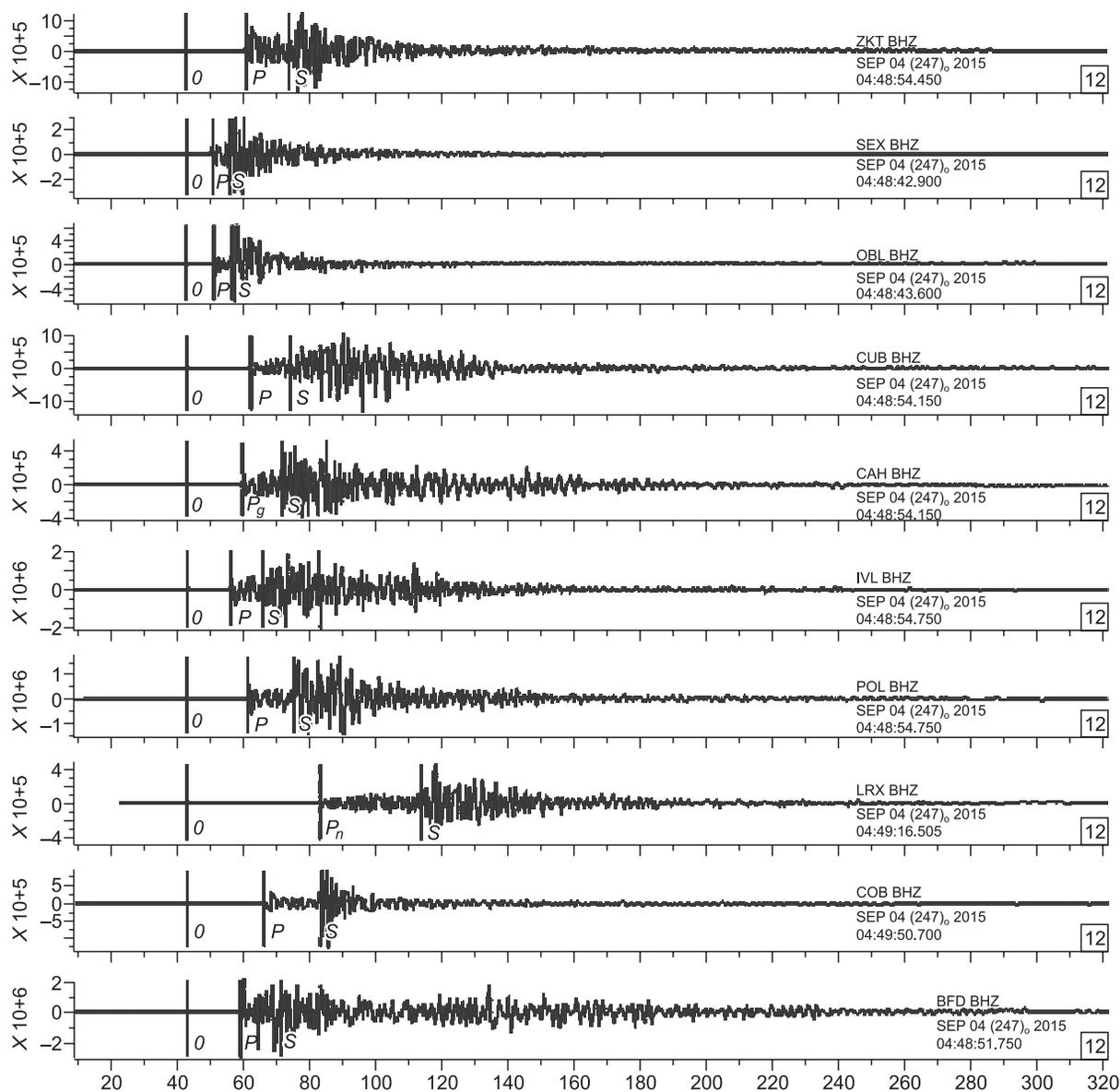


Рис. 1. Широкополосная волновая запись землетрясения, произошедшего 04.09.2015 г. с магнитудой 5.9 в формате SAC.

Хотя очаг сильного землетрясения является протяженным объектом, при изучении его характеристик в первом приближении используется модель точечного источника. Это оправдано при рассмотрении длин волн значительно больших геометрических размеров очага и временных периодов, существенно превышающих длительность процесса разрыва в очаге. На практике эти положения выполняются лишь приближенно.

В работе была использована одномерная скоростная модель, полученная по данным времен пробега продольных и поперечных P , P_g , P_n , S , S_g и S_n волн, зарегистрированных сетью телеметрических станций за период 2005—2012 гг. с $M_l \geq 2.5$. Построение проводилось по программе VELEST — программы для расчета одномерных скоростных моделей по временам пробега волн [Етирмишли, Казымова, 2012]. Было выделено четыре рассматриваемых нами региона: Большой Кавказ, Нижнекуринская впадина, Шамахи-Исмаиллинская зона и акватория Каспийского моря (табл. 1).

Таким образом, на основе вышесказанного были построены и проанализированы механизмы очагов сильных землетрясений, произошедших в 2012—2015 гг., с магнитудой выше 4.0 и установлены характерные особенности сеймотектонической деформации в отдельных сейсмогенных зонах респуб-

Таблица 1. Скоростная модель среды, принятая в расчетах механизмов очагов

Интервал глубин, км	Плотность, г/см ³	Скорость, км/с		Интервал глубин, км	Плотность, г/см ³	Скорость, км/с	
		P-волн	S-волн			P-волн	S-волн
Зона Большого Кавказа				Зона Нижнекуринской впадины			
3	2.3	3.88	2.25	3	2.3	3.99	2.09
5	2.4	4.21	2.57	5	2.4	4.2	2.18
7	2.5	4.38	2.57	8	2.5	4.2	2.41
10	2.7	5.9	3.26	10	2.7	5.32	3.56
15	2.9	6.4	3.55	15	2.9	6.2	3.57
23	2.9	6.68	3.82	25	2.9	7.33	4.25
34	3.0	7.09	3.97	35	3.0	7.76	4.25
44	3.0	7.35	3.97	40	3.1	7.76	4.46
50	3.0	7.52	4.64	50	3.1	7.88	4.48
60	3.3	8.52	4.79	70	3.1	7.92	4.48
Шамахи-Исмаиллинская зона				Акватория Каспийского моря			
3	2.3	3.62	2.33	3	2.2	3.34	2.06
5	2.4	4.21	2.43	5	2.4	3.34	2.06
8	2.5	4.49	2.64	8	2.5	3.56	2.25
10	2.7	5.04	3.19	10	2.7	5.53	3.50
15	2.9	6.02	3.53	15	2.9	5.91	3.50
25	3.0	7.97	4.11	25	3.0	7.34	4.23
35	3.0	7.97	4.12	35	3.0	7.35	4.23
40	3.0	7.97	4.41	40	3.1	7.85	4.43
50	3.3	8.13	4.48	50	3.3	8.31	4.66
70	3.3	8.16	4.59	70	3.3	8.39	4.73

лики, а именно, в Закатальском, Шекинском, Габалинском, Огузском, Гаджигабульском, Исмаиллинском районах, а также в зоне Каспийского моря (рис. 3, табл. 2). На рисунке 4 показаны стереограммы механизмов очага на схеме основных элементов разрывной тектоники изучаемого региона [Шихалибейли и др., 2013].

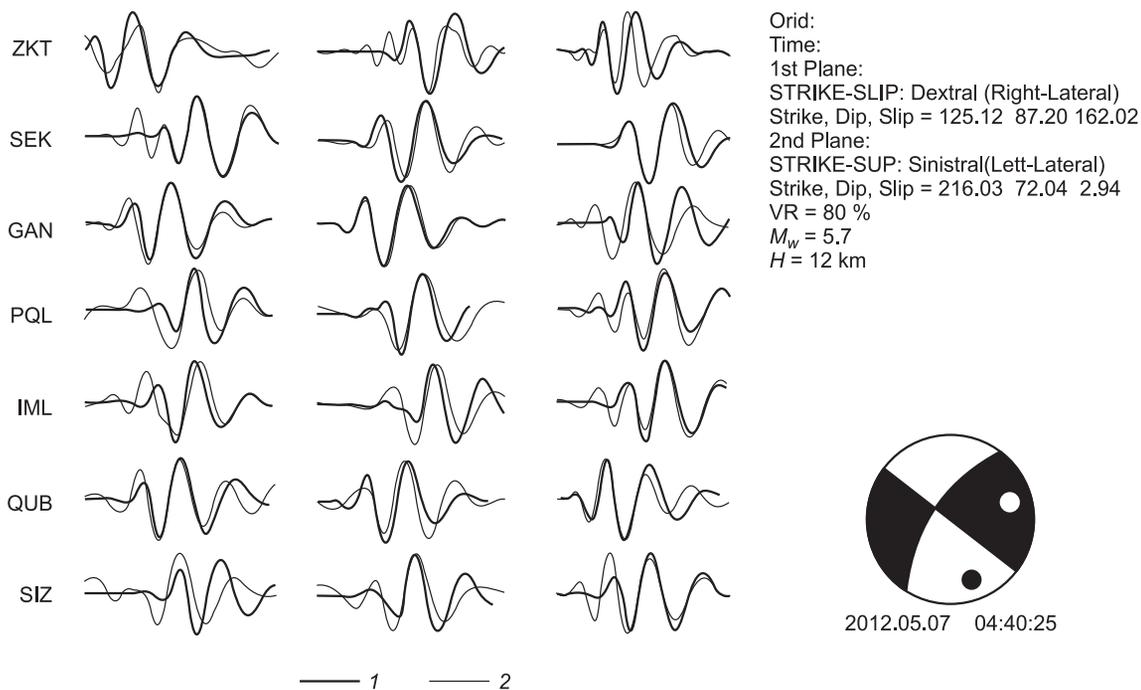


Рис. 2. Волновые формы: реальные (1) и синтетические (2), а также решение механизма очага на примере землетрясения, произошедшего 07.05.2012 г. с магнитудой 5.6.

РАССМОТРИМ КАЖДОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ В ОТДЕЛЬНОСТИ

Землетрясение 7 мая 2012 г., произошедшее в районе Закатальского района с $M_I = 5.6$, характеризовалось близгоризонтальными ($PL_P = 10^\circ$) сжимающими и растягивающими ($PL_T = 14^\circ$) напряжениями. Тип движения по обеим крутым ($DP_1 = 87^\circ$, $DP_2 = 72^\circ$) плоскостям — сдвиг. Плоскость $NP1$ имеет юго-восточное ($STK_1 = 125^\circ$) простирание с типом подвижки правосторонний сдвиг, а $NP2$ — юго-западное ($STK_2 = 216^\circ$) с типом подвижки — левосторонний сдвиг. Сопоставление простирания нодальных плоскостей с линиями разломов показывает согласие первой нодальной плоскости $NP1$ с правосторонними Казах-Сигнахским и Гянджачай-Алазанским поперечными разломами, что позволяет считать действующей именно плоскость $NP2$. В тот же день наблюдалось еще одно ощутимое землетрясение с $M_I = 5.7$.

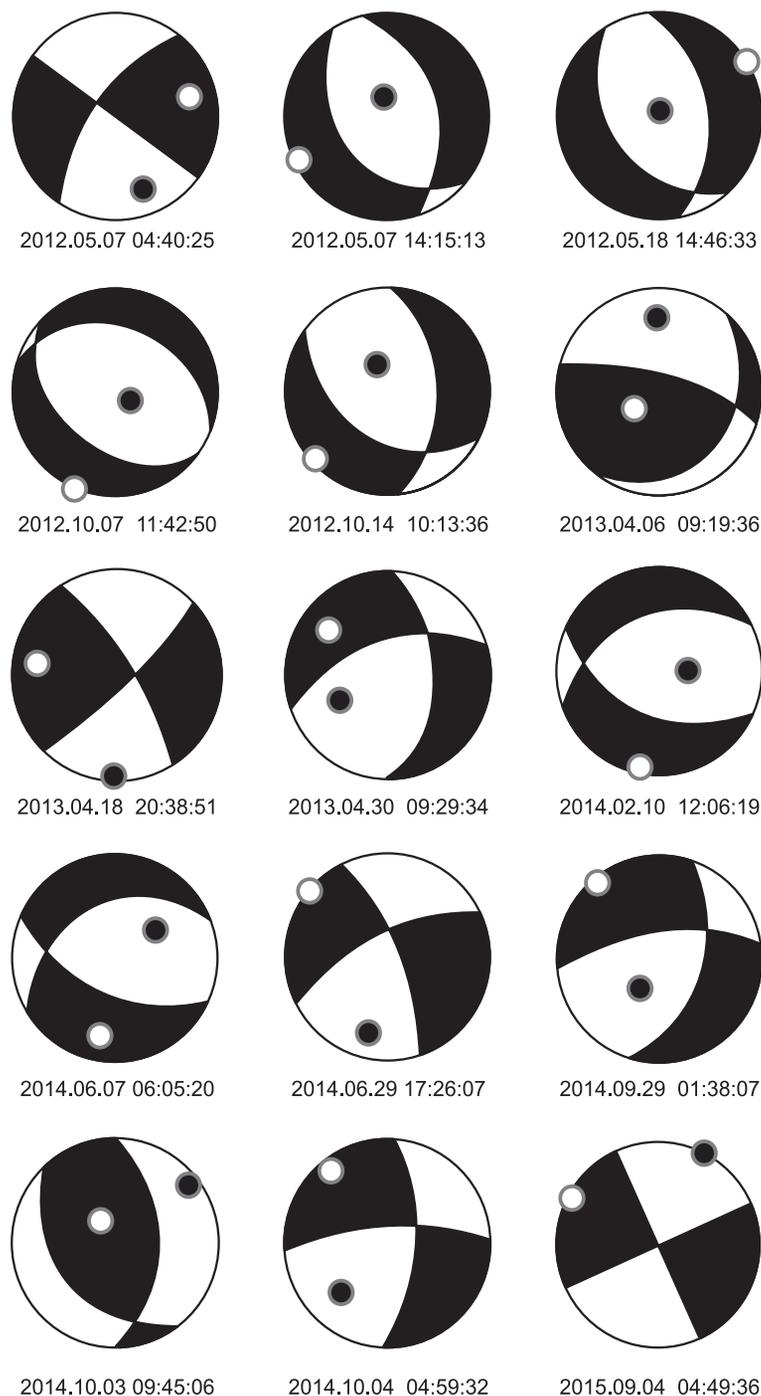


Рис. 3. Стереогаммы механизмов очагов землетрясений, произошедших на территории Азербайджана в 2012—2015 гг. с магнитудой выше 4.0.

Таблица 2. Параметры механизмов очагов для землетрясений 2012—2015 гг. с $M_l \geq 4.0$

№ п/п	Дата, год. мес. день	t_0 , ч : мин : с	H , км	M_l	M_w	Координаты очагов		Нодальные плоскости					
						с.ш.	в.д.	NP1			NP2		
								STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
1	2012.05.07	04:40:25	9	5.6	5.9	41.50	46.58	125	87	162	216	72	2
2	2012.05.07	14:15:13	12	5.7	5.3	41.56	46.63	130	48	-117	349	48	-62
3	2012.05.18	14:46:33	13	5.0	5.1	41.53	46.62	354	47	-68	144	47	-111
4	2012.10.07	11:42:50	41	5.3	5.1	40.70	48.35	128	45	-81	295	45	-98
5	2012.10.14	10:13:36	8	5.7	5.6	41.66	46.27	116	58	-141	2	58	-39
6	2013.04.06	09:19:36	26	4.0	3.8	40.98	46.67	286	81	108	40	20	24
7	2013.04.18	20:38:51	25	4.5	4.6	41.10	47.28	54	85	6	323	83	175
8	2013.04.30	09:29:34	10	4.2	4.3	40.44	48.02	254	72	-38	357	53	-158
9	2014.02.10	12:06:19	46	5.7	5.5	40.23	48.62	125	59	-57	253	44	-132
10	2014.06.07	06:05:20	61	5.6	5.4	40.13	51.66	119	66	-59	243	38	-139
11	2014.06.29	17:26:07	9	5.2	5.0	41.54	46.54	241	79	-15	334	75	-169
12	2014.09.29	01:38:07	11	5.5	5.1	41.13	47.94	265	64	-43	17	53	-146
13	2014.10.03	09:45:06	8	4.0	4.0	41.24	45.61	354	58	120	127	43	52
14	2014.10.04	04:59:32	6	5.0	4.9	41.11	47.94	268	82	-25	1	65	-171
15	2015.09.04	04:49:36	16	5.9	5.5	40.97	47.43	153	90	-180	63	90	0

Землетрясение произошло под действием близгоризонтальных растягивающих напряжений ($PL_T = 1^\circ$). Тип подвижки по первой нодальной плоскости NP1 — сброс с элементами правостороннего сдвига, по второй — сброс с элементами левостороннего сдвига. 18 мая 2012 г. в этой зоне было зафиксировано землетрясение с $M_l = 5.0$. Механизм этого землетрясения идентичен с предыдущим, тип подвижки — сброс с элементами сдвига (рис. 5).

Далее в том же году происходят еще два ощутимых землетрясения — в Исмаиллинском районе 7 октября с $M_l = 5.3$ и Балакенском районе с $M_l = 5.7$. Оба эти землетрясения произошли под действием близгоризонтальных растягивающих напряжений ($PL_T = 0^\circ$). Тип подвижки землетрясений — сброс с элементами сдвига (рис. 6). Подвижка Исмаиллинского землетрясения связана с активностью Северо-Аджиноурского разлома.

Согласно результатам международных сейсмологических центров USGS, CPP, GFZ, HARV, механизм очага первого Закатальского землетрясения (GMT 4:40, $M_w = 5.6$) взбросовый, а второго землетрясения (GMT 14:15, $M_w = 5.7$) — сбросовый, практически из одного очага (одинаковая глубина 10 км и идентичные координаты эпицентра). Для Балакенского землетрясения (GMT 14:15, $M_w = 5.7$) — взбросовый (рис. 7, 8). Подобная ситуация с точки зрения тектоники и геодинамики загадочна и подробно была рассмотрена в работе [Рзаев, Метаксас, 2011]. Тем более, что результаты детальных расчетов механизмов очага указанных землетрясений, выполненные в РЦСС НАНА, иллюстрируют отличные значения параметров механизма очага.

По мнению авторов [Рзаев, Метаксас, 2011], в зоне поперечной Шамхор-Закатальской структуры с высоко приподнятым доальпийским основанием в области мегантиклинория Большого Кавказа надвиги, наблюдаемые на поверхности, имеют неглубокое заложение и не определяют сейсмичность данного района, которая связана в основном с крутопадающими сбросами по боковым (южным и северным) ограничениям приподнятых блоков доальпийского основания, насыщенных магнитоактивными магматическими породами, а также с поперечными сдвигами. К востоку же от Гянджачай-Алазанского разлома, где поверхность доальпийского основания ступенчато погружается к востоку до 6 и 8 км, наряду со сбросами, проявляется сейсмогенный характер взбросонадвигов, развитию которых на глубину при общем режиме сжатия Большого Кавказа не препятствовало высокое положение поверхности доальпийского основания, как это имело место в области поперечной структуры (рис. 9).

Изложенное позволяет предположить, что Закатальские землетрясения являются следствием геодинамического режима земной коры Закатальской очаговой зоны, параметры которого обусловлены подвижками земной коры по системе продольных (общекавказского простирания) и поперечных (антикавказского простирания) разломов; среди последних главная роль принадлежит, по всей вероятности, паре правосторонних сдвигов — Казах-Сигнахскому и Гянджачай-Алазанскому.

Таким образом, механизмы очагов рассмотренных землетрясений — сбросы с левосторонней сдвиговой компонентой. Последнее решение представляется предпочтительным, в особенности для первого Закатальского землетрясения, так как наличие субширотного или общекавказского взброса в

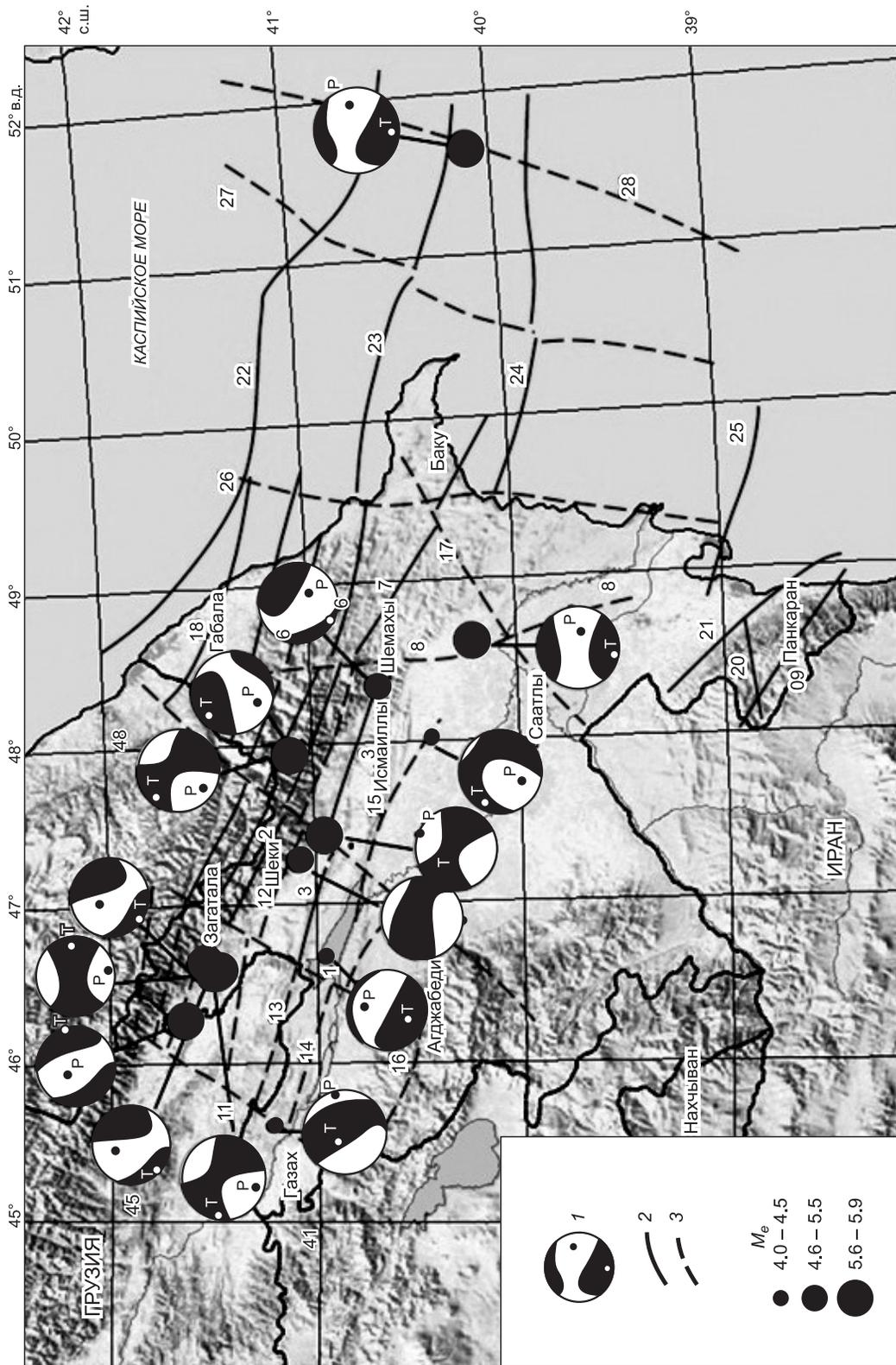


Рис. 4. Схема разломной структуры и механизмы очагов землетрясений 2012—2015 гг. с $M_e \geq 4.0$.

1 — стереограмма механизма очага, 2 — взбросы, 3 — сбросы, сдвиги. Разломы: 1 — Дашгиль-Мурдесинский, 2 — Вандамский, 3 — Гюкчайский, 4 — Сназанский, 5 — Занги-Козлучайский, 6 — Гермианский, 7 — Аджичай-Алятский, 8 — Западно-Каспийский, 9 — Арпа-Самурский, 10 — Гялджачай-Алазанский, 11 — Казах-Ситнахский, 12 — Северо-Аджиноурский, 13 — Иорский, 14 — Куринский, 15 — Мингячевир-Саатлинский, 16 — Башлыбельский, 17 — Пальмиро-Абшеронский, 18 — Ахты-Нютеди-Килиазинский, 19 — Тальшский, 20 — Ярдымлинский, 21 — Предтальшский, 22 — Централно-Каспийский, 23 — Апшерон-Прибалханский, 24 — Сангачал-Огурчинский, 25 — Мильско-Чикшилярский, 26 — Яшминская флексура, 26а — Гызылагачский, 27 — Шахово-Азизбековский, 28 — Карабогаз-Сафидрудский.

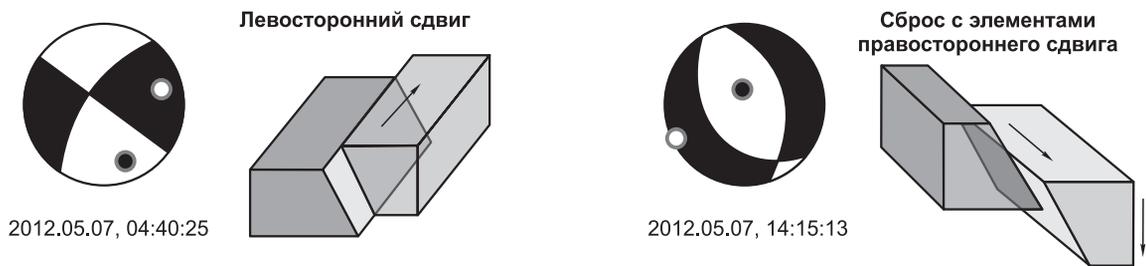


Рис. 5. Механизмы очага Закаतालских землетрясений 2012 г., а также блок-схемы смещения по плоскостям: NP1 — 2012.05.07, 14:15:13 и NP2 — 2012.05.07; 04:40:25.

данном районе отвергается геодинамической моделью исследуемого региона, так же как и чистого сброса без горизонтальной компоненты для второго землетрясения.

На рисунке 10 представлен механизм очага Исмаиллинского землетрясения по данным международных сейсмологических центров USGS, CPP, GFZ, HARV, как и предыдущие, данное землетрясение представлено в виде взброса.

Шамахи-Исмаиллинская очаговая зона расположена в пределах юго-восточного сегмента Большого Кавказа и характеризуется сложным ступенчато-блоковым строением. Предполагается [Ахмедбейли и др., 2010], что тектонические ступени в доальпийском основании осложнены серией крутопадающих, формирующих опущенные и приподнятые блоки поперечных и продольных разломов, которые в мезокайнозойском комплексе трансформированы в пологие взбросы и надвиги.

На основании работ [Керимов, Шихалибейли, 1992; Кенгерли, 2007] была составлена схема основных элементов разрывной тектоники Шамахи-Исмаиллинской очаговой зоны (рис. 11), на которую нанесен эпицентр исследуемого землетрясения. Видно, что эпицентр связан с Западно-Каспийским и Северо-Аджиноурским сбрососдвигами, дополнительно характеризуя высокую сейсмическую актив-



Рис. 6. Механизм очага Балакентского землетрясения 2012 г., а также блок-схема смещения.

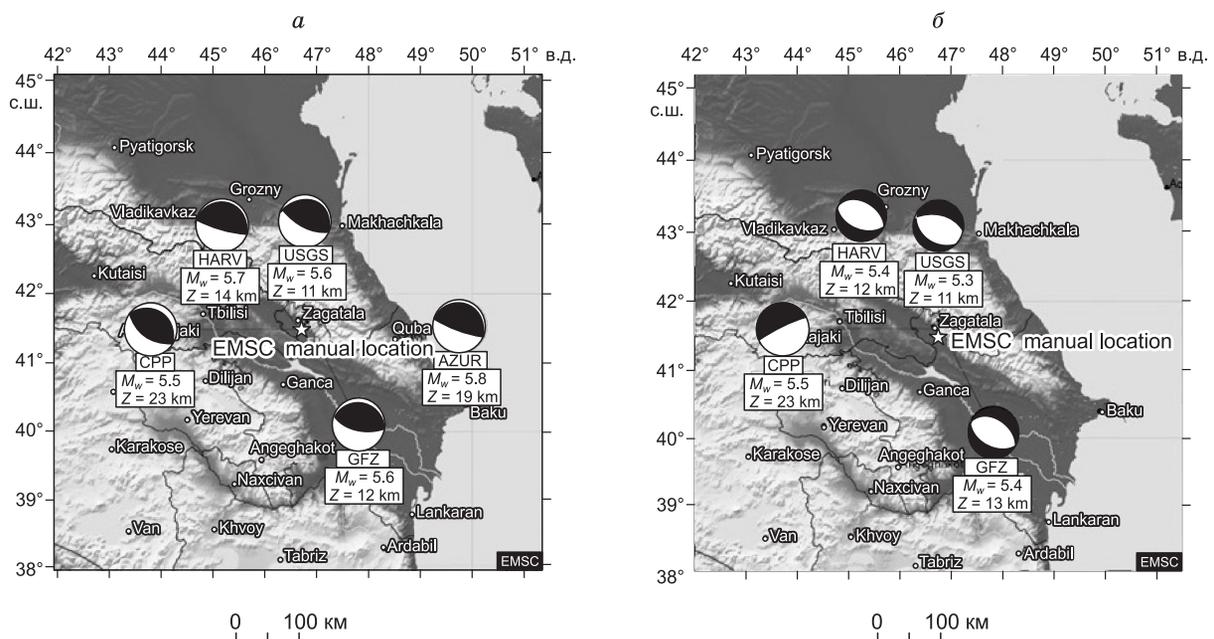


Рис. 7. Механизмы очагов Закаतालских (2012 г.) землетрясений.

Механизмы очага по данным международных сейсмологических центров: а — землетрясения GMT 4:40, $M_w = 5.6$, б — землетрясения GMT 14:15, $M_w = 5.7$.

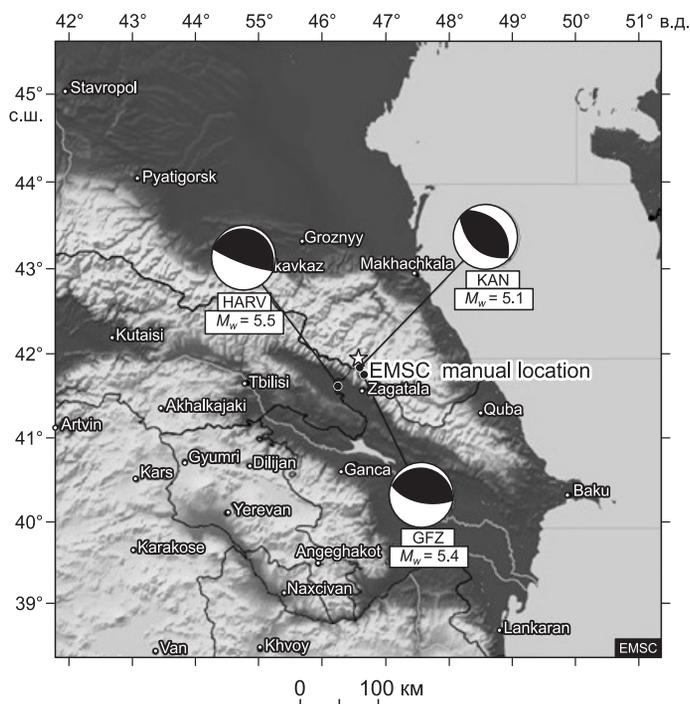


Рис. 8. Механизмы очагов Балакенского землетрясения (2012 г.).

Механизмы очага по данным международных сейсмологических центров: GMT 10:13, $M_w = 5.4$.

ность и глубокое проникновение на глубину Западно-Каспийского правостороннего ортогонального разлома.

В 2013 г. землетрясений с магнитудой больше пяти не наблюдалось, однако мы выделили три ощутимых землетрясения, произошедших в Мингячевирском (2013.04.06), Шекинском (2013.04.18) и Кюрдямирском (2013.04.30) районах. Тип движения по первой плоскости Мингячевирского землетрясения — взброс с элементами правостороннего сдвига, по второй плоскости — левосторонний сдвигонадвиг. Углы наклона плоскостей меняются от 81 до 20°. $NP1$ имеет северо-западное простирание, плоскость $NP2$ — северо-восточное. Простирание нодальных плоскостей механизма очага показывает

согласие лишь одной ($NP1$) из них, соответствующей Геокчайскому разлому. Тип подвижки Шекинского землетрясения, как и в предыдущие годы, по обеим плоскостям — сдвиг с элементами взброса (Вандамский разлом), а Кюрдямирского землетрясения — сброс с элементами сдвига, соответствующий Мингячевир-Саатлинскому разлому.

Для ощутимого землетрясения 10 февраля 2014 г., произошедшего в Гаджигабульском районе, напряжения сжатия восток–северо-восточной ориентации ($AZM = 87^\circ$) близвертикальны ($PL_p = 61^\circ$), а напряжения растяжения юг-юго-западной ориентации ($AZM = 192^\circ$) близгоризонтальны ($PL_p = 8^\circ$). Тип движения по обеим плоскостям ($DP_1 = 59^\circ$ и $DP_2 = 44^\circ$) — сброс с элементами сдвига. Плоскость $NP1$ имеет юго-восточное простирание ($STK_1 = 125^\circ$), $NP2$ — юго-западное ($STK_2 = 253^\circ$). Сопоставление простирания нодальных плоскостей с линиями разломов (см. рис. 4) показывает согласие второй нодальной плоскости $NP2$ с двумя — продольным Куринским и ортогональным Исмаилы-Габалинским разломами. Поэтому есть основание считать ее действующей.

Каспийское землетрясение, произошедшее 7 июня 2014 г., возникло под действием близгоризонтальных растягивающих напряжений ($PL_T = 15^\circ$). Тип движения по обеим плоскостям — сброс с элементами сдвига. Плоскость $NP1$ имеет юго-восточное простирание ($STK_1 = 119^\circ$), а плоскость $NP2$ имеет юго-западное простирание ($STK_2 = 243^\circ$). Тип движения по обеим плоскостям ($DP_1 = 66^\circ$, $DP_2 = 38^\circ$) — сброс с элементами сдвига, согласованный с Абшерон-Прибалханским разломом.

Землетрясение 29 июня 2014 г., произошедшее в районе Закатала-Балакен с $M_1 = 5.3$, характеризовалось близгоризонтальными ($PL_p = 18^\circ$) сжи-

Рис. 9. Карта эпицентров землетрясений Закатала-Балакенского региона, произошедших в 2012 г., и схема разломной структуры южного склона Большого Кавказа.

1 — автешоковое поле, 2 — сдвиги, 3 — сбросы, 4 — взбросы. Разломы: 1 — Казах-Сигнахский, 2 — Шарур-Закатальский, 3 — Гянджачай-Алазанский, 4 — Иорский, 5 — Северо-Аджиноурский, 6 — Вандамский, 7 — Дашгиль-Мудресинский, 8 — Занги-Козлучайский, 9 — Арпа-Самусский.

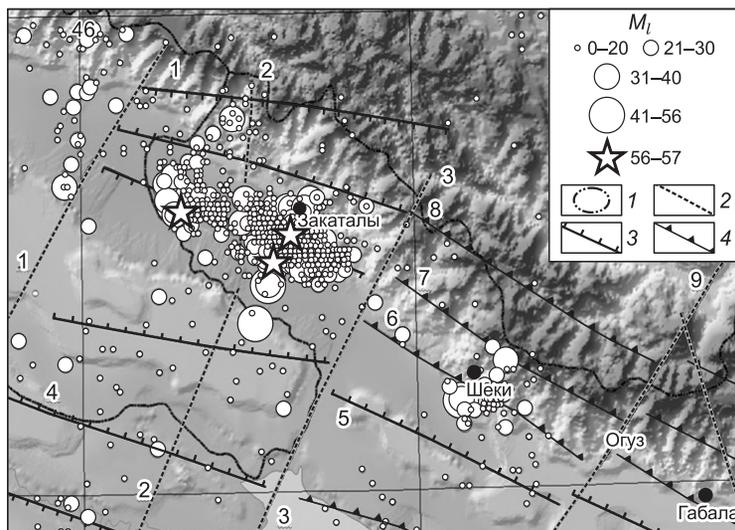


Рис. 10. Механизмы очагов Исаиллинского землетрясения (2012 г.).

Механизмы очага по данным международных сейсмологических центров: GMT 11:42, $M_w = 5.1$.

мающими и растягивающими ($PL_T = 3.0^\circ$) напряжениями, ориентированными на юго-запад ($AZM = 197^\circ$) и северо-запад ($AZM = 288^\circ$). Тип движения по обеим крутым ($DP_1 = 79^\circ, DP_2 = 75^\circ$) плоскостям — сдвиг. Плоскость $NP1$ близширотна ($STK_1 = 241^\circ$), а $NP2$ — близмеридиональна ($STK_2 = 334^\circ$). Сопоставление простирания нодальных плоскостей с линиями разломов (см. рис. 6) показывает согласие первой нодальной плоскости $NP1$ с правосторонними Казах-Сигнахским и Гянджачай-Алазанским поперечными разломами, что позволяет считать действующей именно плоскость $NP1$.

29 сентября и 4 октября 2014 г., к СВ от г. Габала произошло два землетрясения с $M_l = 5.5$ и 5.0 . В очаге первого землетрясения преобладали близвертикальные ($PL_p = 48^\circ$) сжимающие напряжения, ориентированные на юго-запад ($AZM = 265^\circ$). Тип движения по обеим крутым ($DP_1 = 64^\circ, DP_2 = 53^\circ$) плоскостям — сбрососдвиг. Плоскость $NP1$ широтна ($STK_1 = 265^\circ$), а $NP2$ — меридиональна ($STK_2 = 17^\circ$). Сопоставление простирания нодальных плоскостей с линиями разломов на рис. 6 показывает согласие второй нодальной плоскости $NP2$ с Исаиллы-Габалинским ортогональным разломом.

Подвижка в очаге второго землетрясения возникла под действием близгоризонтальных ($PL_p = 23^\circ$) сжимающих напряжений. Тип движения по обеим плоскостям — сдвиг с элементами сброса. Плоскость $NP1$ широтна ($STK_1 = 268^\circ$), а $NP2$ — меридиональна ($STK_2 = 1^\circ$). Сопоставление простирания нодальных плоскостей с линиями разломов (см. рис. 6) показывает согласие первой нодальной плоскости $NP1$ с Ар-

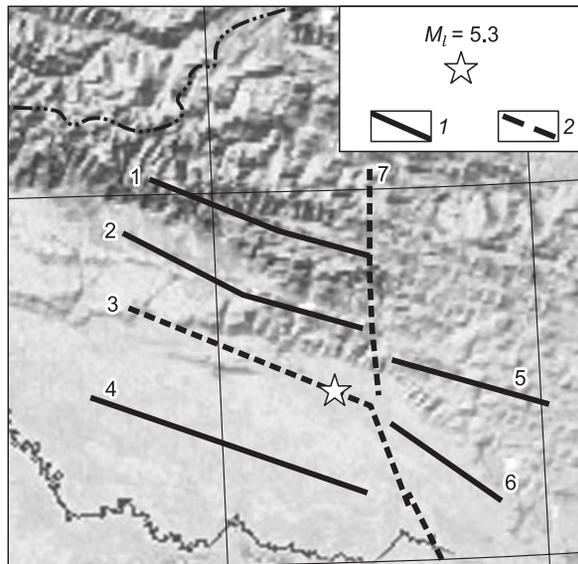
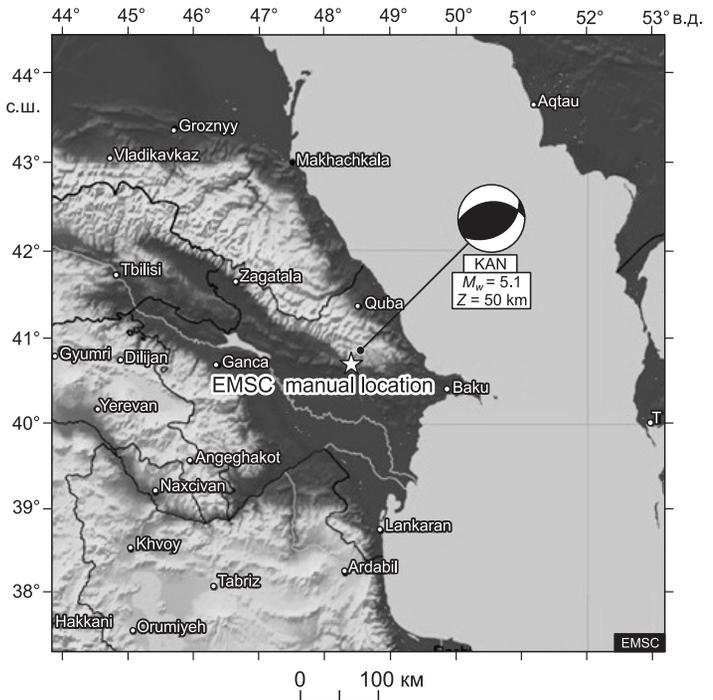


Рис. 11. Схема разломной структуры Шаха-Исмаиллинской очаговой зоны.

1 — взбросы, 2 — сбросы, сдвиги. Разломы: 1 — Дашгиль-Мудресинский, 2 — Вандамский, 3 — Геокчайский, 4 — Занги-Козлучайский, 5 — Гермианский, 6 — Аджичай-Алятский, 7 — Западно-Каспийский.

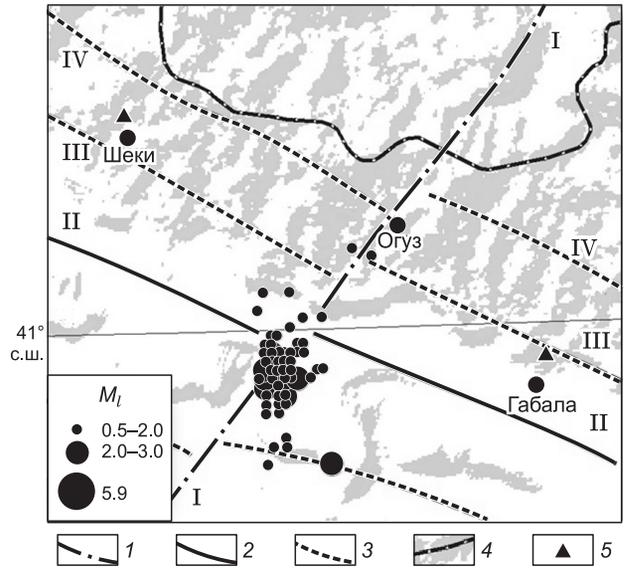


Рис. 12. Афтершоковое поле сильного Огузского землетрясения 4 сентября 2015 г. с $M_l = 5.9$.

Разломы: I — Арпа-Самурский, II — Северо-Аджиноурский, III — Вандамский, IV — Дашгиль-Мудресинский. 1 — сдвиги, 2 — сбросы, 3 — взбросы, 4 — госграница республики, 5 — сейсмические станции.

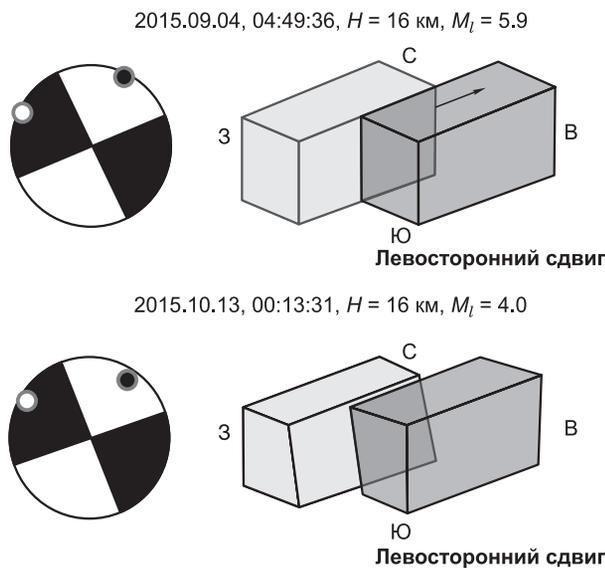


Рис. 13. Механизмы очага землетрясений, а также блок-схемы смещения по плоскости $NP2$.

ском районе 4 сентября 2015 г. Сейсмические колебания данного землетрясения были зарегистрированы 18 мировыми агентствами и почти 400 сейсмическими станциями в широком азимутальном окружении на расстояниях от 300 до 13 407 км от эпицентра. На основе макросейсмических исследований было выявлено, что с наибольшей интенсивностью землетрясение ощущалось на территориях Огузского и Шекинских районов. Здесь интенсивность землетрясения по таблице MSK-64 была оценена в 7 баллов. Землетрясение сопровождалось более 80 афтершоками с магнитудой от 0.5 до 4, из которых 33 произошли в первые сутки. Как видно на рис. 12, эпицентр землетрясения приурочен к зоне пересечения продольного Дашгиль-Мудресинского и поперечного Арпа-Самурского разломов [Шихалибейли, 1996; Кенгерли, 2007]. Нужно отметить, что Арпа-Самурский глубинный разлом древнего заложения во все времена от палеозоя по ныне является зоной активного проявления тектонических движений, проводником магматических расплавов, рудоносных растворов и сейсмичности. По данным Э.Ш. Шихалибейли [1996], Арпа-Самурская транскавказская сейсмоактивно-металлоносная зона разломов объединяет Мровдаг-Зодский, Тертерский и Хачинский разломы глубокого заложения. Из общего количества афтершоков наиболее ощутимый произошел 13 октября в 00 ч 13 мин.

Таким образом, для достоверности результата были построены и проанализированы механизмы двух землетрясений: 04.09.2015 с $M_I = 5.9$ (основной толчок) и 13.10.2015 с $M_I = 4.0$. Землетрясения, произошедшие в Огузском районе 4 сентября в 04 ч 49 мин и 13 октября в 00 ч 13 мин, произошли под действием близких по величине растягивающих и сжимающих напряжений. Из таблицы 3 видно, что первая нодальная плоскость разрыва простирается в ЮВ направлении (153°), вторая нодальная плоскость имеет СВ простирание (63°). При этом напряжения сжатия в очаге землетрясения были ориентированы в СВ направлении (аз. 18°) и действовали близгоризонтально (угол с горизонтом $0-7^\circ$), а растягивающие усилия были направлены в 3-ЮЗ направлении (аз. $287-288^\circ$) под углом в $0-2^\circ$ к горизонту. Тип подвижки этих землетрясений — левосторонний сдвиг.

Как было отмечено выше, эпицентры Огузских землетрясений приурочены к Арпа-Самурскому разлому и могут быть проинтерпретированы как левосторонняя сдвиговая деформация в зоне геодинамического влияния левостороннего Арпа-Самурского разлома. На рисунке 13 показаны стереограммы механизмов очагов двух проанализированных землетрясений, а также блок-схема смещения по плоскости $NP2$, соответствующая указанному разлому.

На рисунке 14 видно, как афтершоки мигрируют в СВ направлении вдоль поперечного разлома, углубляясь на 35 км. Нужно отметить, что ана-

Рис. 14. Трехмерная модель афтершокового поля Огузского землетрясения 4 сентября 2015 г. с $M_I = 5.9$.

Разломы: I — Арпа-Самурский, II — Северо-Аджиноурский.

па-Самурским поперечным разломом. Скорее всего, именно эта плоскость является действующей.

3 октября 2014 г. произошло землетрясение в Газахском районе с $M_I = 4.0$. Для данного землетрясения преобладающими являлись сжимающие напряжения. Тип подвижки по $NP1$, ориентированной на север, — взброс с элементами правостороннего сдвига, по $NP2$, ориентированной на юго-восток, — взброс с элементами левостороннего сдвига. Сопоставление простирания нодальных плоскостей с линиями разломов показывает согласие обеих нодальных плоскостей с Занги-Козлучайским взбросо-надвигом.

Одним из наиболее сильных за последние 10 лет является землетрясение, произошедшее в Огуз-

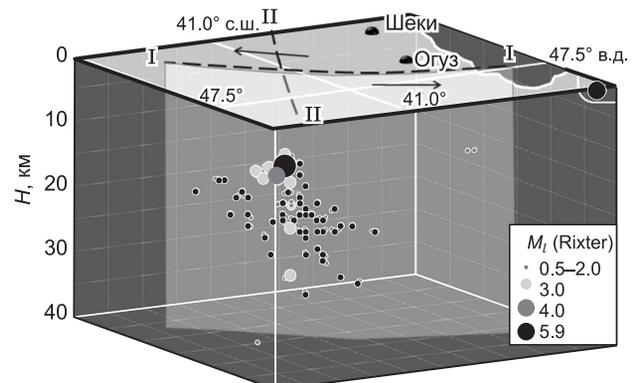


Таблица 3. Параметры механизмов очагов Огузских землетрясений 2016 г. с $M_l = 5.9-4.0$

Дата, год. мес. день	t_0 , ч : мин : с	H , км	Магнитуда			Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
			M_l	M_b	M_w	T		N		P		NP1			NP2		
						PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
2015.09.04	04:49:36	16	5.9	5.4	5.5	0	288	90	171	0	18	153	90	-180	63	90	0
2015.10.13	00:13:31	16	4.0	—	—	2	287	82	180	7	18	153	86	-172	63	83	-4

лиз механизмов двух других афтершоков (2015.09.04 с $M_l = 3.3$ и 2015.09.29 с $M_l = 3.3$) показал сбросовый тип подвижек, что связано с влиянием Северо-Аджиноурского сбросового продольного разлома.

Выше было сказано, что данные землетрясения зафиксированы 18 мировыми агентствами, проведен сравнительный анализ решений механизма очага региональными. Установлено, что решение тензора сейсмического момента центра USGS и GFZ близко к решению, полученному по данным сети сейсмических станций РЦСС (рис. 15).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разделение выборки на сбросы, сдвиги и взбросы позволило выявить как значимые отличия, так и близкие совпадения фокальных параметров толчков с разными типами подвижки в очаге.

На рисунках 16 и 17 представлены гистограммы относительных отличий в параметрах механизмов очагов и нодальных плоскостей, полученные при сопоставлении решений механизмов рассматриваемых 15 землетрясений. У почти 80 % толчков осей растяжения и у 40 % толчков осей сжатия отклонения в PL не превышают 20° . Ориентация осей растяжения в основном доминирует в ЮЗ, СЗ направлении, однако для осей сжатия выявляется ориентация в СВ-ЮЗ направлении (67 %) и в СЗ-ЮВ направлении (33 %). Углы падения для подвижек разных типов превышают 45° , что свидетельствует о достаточно крутом погружении зон разломов. Это согласуется с тем, что в исследуемой зоне большинство поперечных разломов имеет углы падения сместителей $50-90^\circ$, т. е. углы, достаточно близкие к вертикали. Анализ углов погружения $SLIP$ показал, что для первой нодальной плоскости 27 % меняется в пределах $-15...-43^\circ$ и 40 % в пределах $-57...-180^\circ$. Для второй нодальной плоскости 60 % очагов меняется в пределах $-62...-171^\circ$. Вариации углов погружения осей главных напряжений в совокупности со значительными стандартными отклонениями свидетельствуют о существенной пространственной неоднородности литосферы.

На основе полученных результатов была построена схематическая карта ориентации осей сжатия и растяжений исследуемых сильных землетрясений. Анализ ориентации осей сжатия показал СЗ-ЮВ ориентацию в Закапальском районе, С-Ю в Шекинском и далее, плавно меняясь по часовой стрелке, к СВ-ЮЗ направлению в Каспийском море. Ось растяжения в основном ориентирована в СВ-ЮЗ и С-Ю направлениях, что связано с зоной погружения Куринской впадины вдоль Главного Кавказского надвига под зону Большого Кавказа (рис. 18).

Анализируя последовательность сейсмических процессов можно заметить, что рассматриваемые очаги имеют определенную связь. Совпадение углов падения DP , модулей $SLIP$ и азимутов простирания STK взбросов и сбросов не исключает возможности подвижек таких типов по плоскостям одних разломов. Возможно, Закапальское землетрясение стало первым толчком, вызвавшее затем серию сильных землетрясений в Балаканском, Шекинском, Огузском, Габалинском и Исмаиллинском районах. Все эти зоны находятся в схожих сеймотектонических условиях. В геологическом строении этих зон принимают участие структурные элементы Тфанского антиклинория, Закапало-Говдагского синклинория, Вандамского

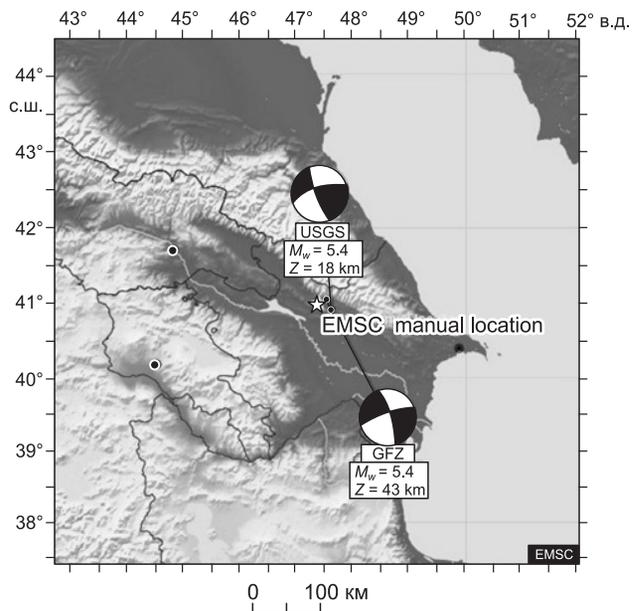


Рис. 15. Механизмы очага Огузских землетрясений, по данным агентств USGS и GFZ.

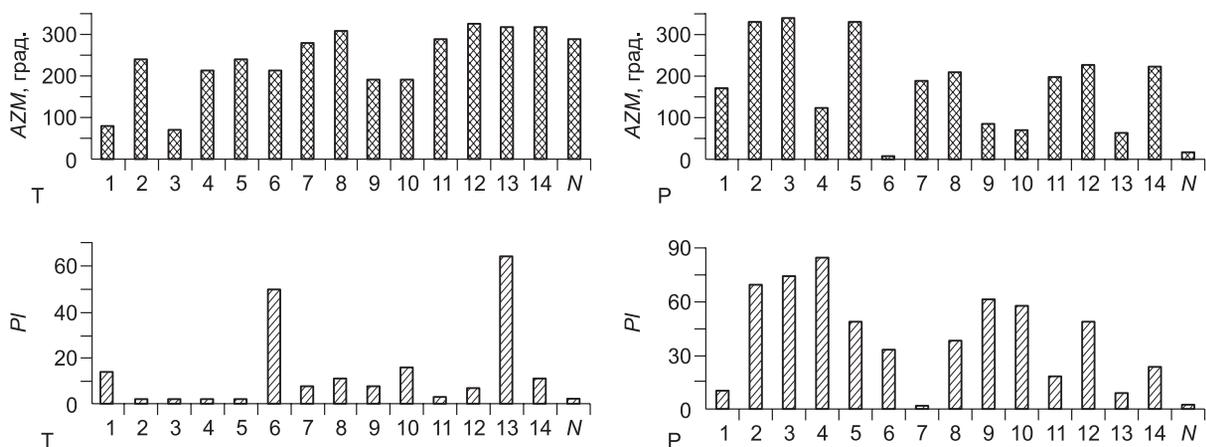


Рис. 16. Гистограммы относительных отличий в параметрах механизмов очагов.

антиклинория и наложенного Алазано-Агричайского прогиба. Эти структуры общекавказского направления отделены друг от друга глубинными субширотными разломами [Шихалибейли, 1996].

Результаты анализа распределений очагов сильных землетрясений позволили сделать вывод о том, что на территории Азербайджана все сильные землетрясения ($M \geq 5.0$) приурочены к зоне поверхности кристаллического фундамента [Маммадли, 2012]. Закавказское и Балакенское землетрясения также подтвердили этот вывод. Исключением является Исмаиллинское землетрясение, глубина которого (H) составляет 41 км, тогда как поверхность кристаллического фундамента здесь находится на глубине 10—12 км (рис. 19). Отметим, что это не единственное землетрясение в Исмаиллинском районе с такой глубиной очага. И до этого здесь был отмечен ряд слабых и средней силы землетрясений с глубиной очага около 40 км. Полагаем, что такое anomalous для этого района сеймотектоническое явление связано со сложной разломной тектоникой данного участка и требует дополнительных исследований [Yetirmishli, 2013]. На рисунке 19 можно также отметить очаговую зону Иранских землетрясений, глубина которых колеблется в пределах 5—20 км. Отметим, что 11 августа 2012 г. в данной зоне на глуби-

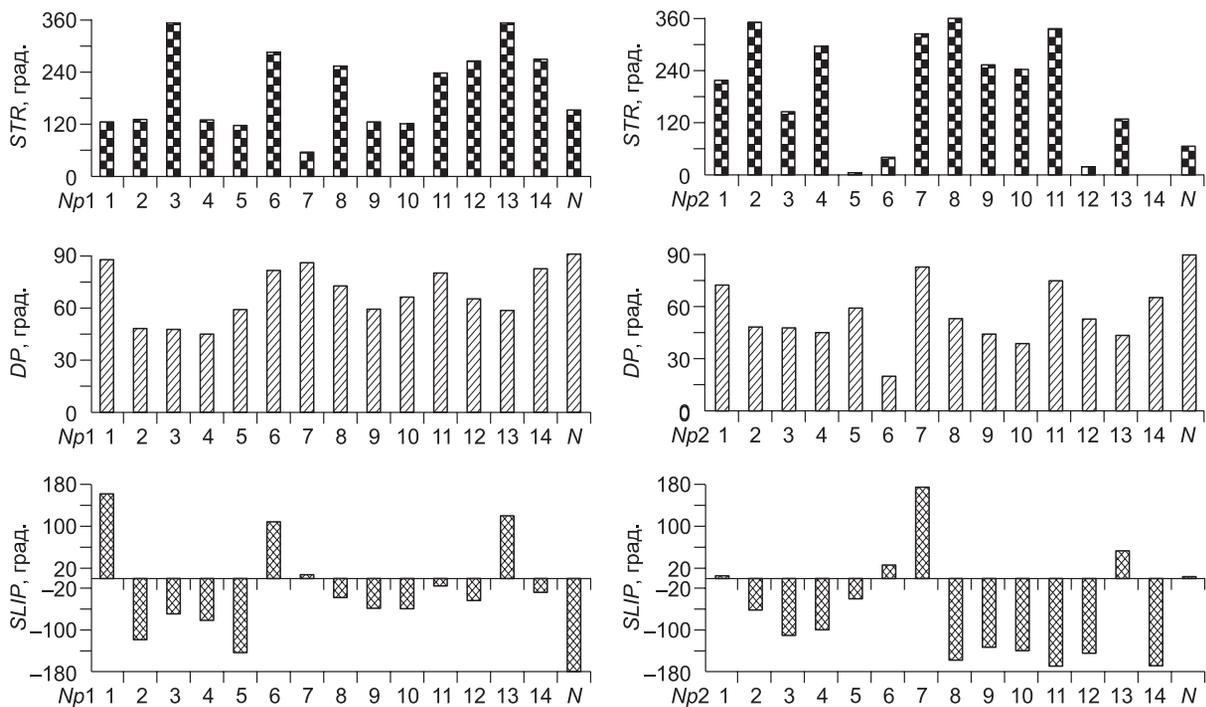


Рис. 17. Гистограммы относительных отличий в параметрах нодальных плоскостей.

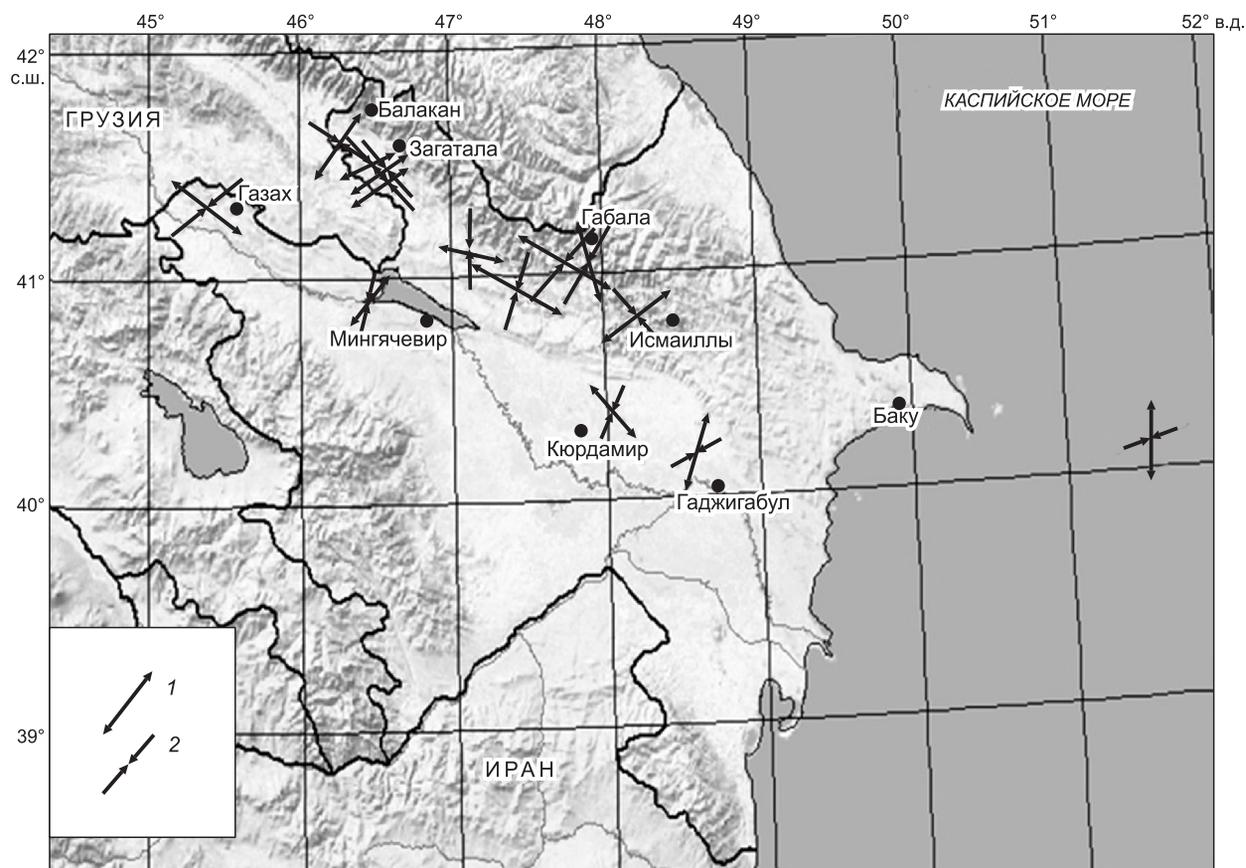


Рис. 18. Схема распределения осей сжатия и растяжения механизмов очагов землетрясений за 2012—2015 гг.

1 — растяжение, 2 — сжатие.

не 10 км произошли два землетрясения с магнитудой 6.4, что повлекло за собой многочисленные афтершоки, продолжающиеся и по сей день.

ВЫВОДЫ

Таким образом, на основе алгоритма по методу инверсии волновых форм — Time-Domain Moment Tensor INVerseCode (TDMT INVC) был произведен расчет тензора сейсмического момента сильных землетрясений Азербайджана за период 2012—2015 гг. на основе широкополосных записей (ВН) современных цифровых станций, что позволило установить характерные особенности сеймотектонической деформации в отдельных сейсмогенных зонах республики, а именно в Закавказском, Шекинском, Габалинском, Огузском, Гаджигабульском, Исмаиллинском районах, а также в зоне Каспийского моря.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод что сейсмическая активность территории Большого Кавказа и центральной части Каспийского акватория в 2012—2015 гг. связана с активизацией поперечных разломов Казах-Сигнахского с падением под углом 72° на ЮВ, Гянджачай-Алазанского с падением на СЗ под углом 58° , Арпа-Самурского с падением под углом $85\text{—}90^\circ$ (гл. 16—25 км) на ЮВ, Исмаиллы-Габалинского с падением на ЮВ под углом 44° (гл. 46 км) и 53° (на глубине 11 км); продольных разломов: Геокчайского с падением на СВ под углом 81° , Мингячевир-Саатлинского с падением на СВ под углом 53° и Абшерон-Прибалханского с падением на ЮЗ под углом 66° . Возможно, Закавказские землетрясения, произошедшие под влиянием правосторонних Казах-Сигнахского и Гянджачай-Алазанского поперечных разломов, явились толчком последующих сильных землетрясений в этой области. Статистический анализ механизмов очагов сильных землетрясений показал преобладание растягивающих горизонтальных напряжений, связанных в основном с активностью поперечных и ортогональных разломов по всей территории Азербайджана.

Ориентация осей растяжения в основном ЮЗ, СЗ направлений, однако для осей сжатия выявляется ориентация в СВ-ЮЗ (67 %) и в СЗ-ЮВ (33 %). Углы падения для подвижек разных типов превы-

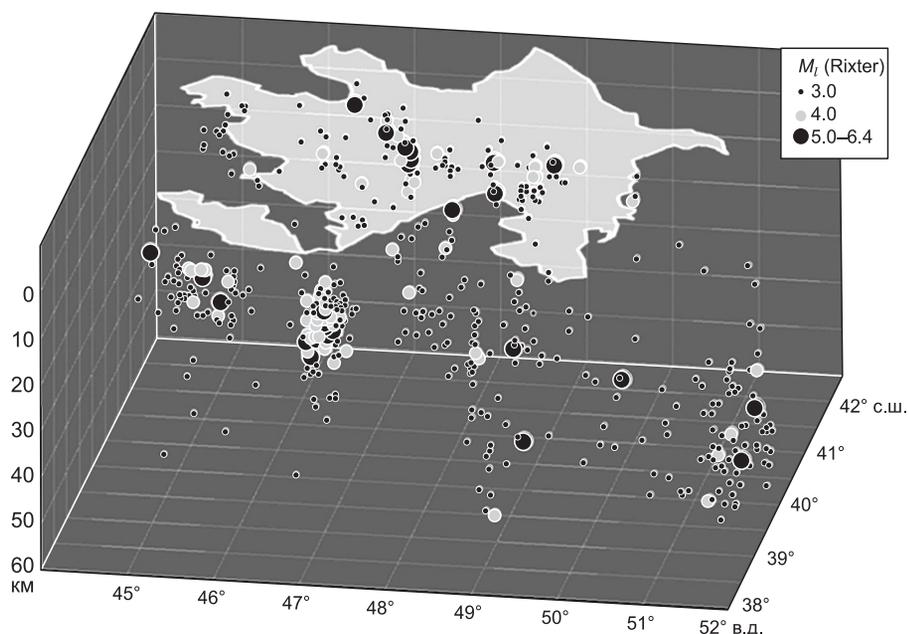


Рис. 19. Трехмерная схема распределения гипоцентров землетрясений Азербайджана с $M_l \geq 3.0$ за 2012—2015 гг.

падают 45°, что свидетельствует о достаточно крутом погружении зон разломов. Это согласуется с тем, что в исследуемой зоне большинство поперечных разломов имеет углы падения сместителей 50–90°, т. е. углы, достаточно близкие к вертикали, например, Казах-Сигнахский, Арпа-Самурский и Гянджачай-Алазанский поперечные разломы, наклон угла падения которых на глубинах 9–20 км колеблется в пределах 58–87°.

Результаты анализа распределений очагов сильных землетрясений по глубине позволили сделать вывод, что на территории Азербайджана в 2012—2015 гг. сильные землетрясения ($M \geq 5.0$) приурочены к зоне поверхности кристаллического фундамента. Закаतालское и Балакенское землетрясения также подтвердили этот вывод. Исключением является Исмаиллинское землетрясение, глубина которого составляет 41 км, тогда как поверхность кристаллического фундамента здесь находится на глубине 10–12 км. Анализ ориентации осей сжатия показал СЗ-ЮВ ориентацию в Закаतालском районе, С-Ю в Шекинском и далее, плавно меняясь по часовой стрелке, к СВ-ЮЗ направлению в Каспийском море. Ось растяжения в основном ориентирована в СВ-ЮЗ и С-Ю направлениях, что связано с зоной погружения Куринской впадины вдоль Главного Кавказского надвига под структуру Большого Кавказа.

ЛИТЕРАТУРА

Асланов Б.С. Тектоника основных геоструктурных элементов Азербайджана и выражение их в гравитационном поле: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Ташкент, 2009, 63 с.

Ахмедбейли Ф.С., Исаева М.И., Кадыров Ф.А., Коробанов В.В. Геодинамика неотектонического этапа Кавказского сегмента Альпийско-Гималайского орогенного пояса. Баку, Элм, 2010, 212 с.

Етирмишли Г.Д., Казымова С.Э. Скоростная модель земной коры Азербайджана по данным цифровых сейсмических станций // Геология и геофизика юга России, 2012, № 1, с. 59–73.

Керимов К.М., Шихалибейли Э.Ш. Карта глубинного строения Черноморско-Южно-Каспийской области регионального прогиба. М-6 1:1000 000. Баку, 1992.

Кенгерли Т.Н. Особенности геолого-тектонического строения Юго-Восточного Кавказа и вопросы нефтегазоносности // *Elmi əsərlər*, 2007, № 9, с. 3–12.

Кушнир А.Ф., Рожков М.В., Саввин Е.А., Чеботарева И.Я. Масштабируемая система сейсмического мониторинга реального времени на основе проблемно-ориентированной программно-алгоритмической среды SNDA в задачах оценки техногенных и природных угроз: практические результаты и перспективы развития // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2010, № 2, вып. № 16, с. 133–145.

Маммадли Т.Я. Сейсмогенерирующие зоны Азербайджана и их глубинные структурные особенности // Сейсмопрогностические наблюдения на территории Азербайджана, 2012, с. 287–295.

Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. О механизмах очагов землетрясений Прибайкалья. http://seis-bykl.ru/modules.php?name=Seismo_mo, 1999 г.

Метаксас Х.П., Рзаев А.Г., Исаева М.И. Параметры сейсмической опасности Шемаха-Исмаиллинской очаговой зоны землетрясений // Azərbaycan ərazisində seysmoproqnoz müşahidələrin kataloqu, 2011, səh. 350—359.

Рзаев А.Г., Метаксас Х.П. Закавказские землетрясения 7 мая 2012 года: загадки геодинамического режима и сейсмомагнитный эффект // Azərbaycan ərazisində seysmoproqnoz müşahidələrin kataloqu, 2011, səh. 350—359.

Рзаев А.Г., Етирмишли К.Дж, Казымова С.Э. Отражение геодинамического режима в вариациях напряженности геомагнитного поля (на примере южного склона Большого Кавказа) // Известия. Науки о Земле, 2013, № 4, с. 3—15.

Сычева Н.А. Исследование особенностей механизмов очагов землетрясений и сейсмотектонических деформаций Северного Тянь-Шаня по данным цифровой сейсмической сети KNET: Автореф. дис...к.ф.-м.н., М., ИФЗ РАН, 2004, 24 с.

Хаин В.Е., Ализаде Ак.А. Геология Азербайджана. Т. IV. Тектоника. Баку, Изд-во Nafta-Press, 2005, с. 214—234.

Шихалибейли Э.Ш. Некоторые проблемные вопросы геологического строения и тектоники Азербайджана. Баку, Элм, 1996, 215 с.

Dreger D.S. Time-domain moment tensor INVerseCode (TDMT_INV). University of California, Berkeley Seismological Laboratory, 2002, 18 p.

Yetirmishli G.C., Mammadli T.Y., Kazimova S.E. Features of seismicity of Azerbaijan part of the greater Caucasus // J. Georgian Geophys. Soc., Issue (A), Phys. Solid Earth, 2013, v. 16a, p. 55—60.

*Рекомендована к печати 15 июня 2018 г.,
В.С. Селезневым*

*Поступила в редакцию
17 августа 2017 г.*