

УДК 551.242

ГЛУБОКОФОКУСНЫЕ, МАНТИЙНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАВКАЗСКОГО ПЕРЕШЕЙКА

© 2020 г. В. И. Шевченко¹, *, А. А. Лукк¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: shevch@ifz.ru

Поступила в редакцию 29.11.2018 г.

После доработки 28.02.2019 г.

Принята к публикации 25.03.2019 г.

По материалам о распределении мантийной сейсмичности и совокупностям фокальных механизмов землетрясений установлено существование и вид деформирования “сосискообразного” по форме мантийного “тела” в пределах восточной части Кавказского перешейка. Оно наклонено и погружается в направлении с юго-востока на северо-запад до глубины 160 км. Конфигурация мантийного тела и вид его напряженного состояния, принципиально отличающегося от такового для земной коры региона, не позволяют принять плейттектоническую интерпретацию этого образования (в виде представления о погружении субдуцирующей части Аравийской литосферной плиты под Евразийскую плиту). Предполагается, что этот феномен связан с процессом тектогенеза, развивающимся в подкоровой мантии Кавказа независимо от коллизионных процессов.

Ключевые слова: мантийная сейсмичность, мантийное “тело”, фокальные механизмы, напряженное состояние, субдуцирующий слэб.

DOI: 10.31857/S000233372002009X

ВВЕДЕНИЕ

Проблема существования глубоких мантийных землетрясений на Кавказе дискутируется на протяжении более 30 лет. Спектр точек зрения — от полного их отрицания [Джибладзе, 1983; Тап, Таумаз, 2006] до демонстрации их скопления в восточной части Кавказского перешейка [Годзиковская, 1988; 2008; 2017; Годзиковская, Рейснер, 1989; Габсатарова, 2010; Габсатарова и др., 2016].

Так, например, Э.А. Джибладзе [1983] провела специальное исследование сообщений о наличии здесь глубоких землетрясений, переопределив заново координаты очагов всех “подозрительных событий”. Из 11 таких событий лишь в одном случае можно было с натяжкой говорить, что его очаг находится либо в самой нижней части земной коры, либо на относительно малых глубинах в подкоровом слое. Это дало ей основание утверждать, что все сообщения о существовании глубоких мантийных землетрясений на Кавказе не вызывают доверия. В более позднем исследовании [Тап, Таумаз, 2006], посвященном изучению фокальных механизмов очагов землетрясений Кавказа с использованием метода инверсии волновых форм длиннопериодных сейсмических записей, указанные авторы приходят к выводу, что сейсмогенный слой на Кавказе ограничен глубиной 20 км, поскольку все построенные ими СМТ-решения (центроид момента тензора) не требуют

для глубин центроида величин более 20 км. Тем самым отрицается существование здесь не только мантийных землетрясений, но и сейсмических событий в низах коры.

Вместе с тем А.А. Годзиковская [1988; 2008; 2017] для обширной выборки сейсмических событий в восточной части Кавказского перешейка (район Терско-Сунженского поднятия) показала принципиальное отличие волновых форм целого ряда сейсмических событий, очаги которых предположительно расположены в верхней мантии, от таковых для обычных коровых землетрясений Кавказа. Тем самым она впервые обосновала принципиальную возможность существования глубоких мантийных землетрясений на Кавказе.

И.П. Габсатарова [2010; 2016], изучая механизмы очагов землетрясений в пределах той же территории, показала принципиальное различие в типе подвижки в очагах землетрясений в земной коре и в подкоровом слое. Для коровых землетрясений тип движения в очагах характеризовался как взбросы и взбросо-сдвиги при близмеридиональном простирании главной оси сжатия. В то же время для семи рассмотренных землетрясений с заглубленными очагами ($h = 126–164$ км) наблюдалось преобладание сил близгоризонтального растяжения и кинематика подвижек определялась сбросами и сбросо-сдвигами. При этом простирания нодальных плоскостей не показали

ярко выраженной тенденции. Таким образом, эти исследования добавили уверенности в существовании мантийной сейсмичности на Большом Кавказе с принципиально отличной от коровых землетрясений геодинамикой.

Следует заметить, что среди известных определений глубоких землетрясений на Большом Кавказе нет ни одного с $M \geq 5.6$. Можно предположить, что сравнительно сильных землетрясений среди мантийных событий вообще не существует. И это еще один фактор, который мешал рассмотрению мантийной сейсмичности на Кавказе.

Охарактеризуем кратко коровую сейсмичность на рассматриваемой территории. Принято связывать расположение очагов землетрясений с разломами разной ориентировки. Результаты наших детальных работ на территории Гармского геодинамического полигона Института физики Земли АН СССР в Таджикистане в целом согласуются с этим представлением. Преобладающим здесь чешуйчатым надвигом, выпаляживающимся вниз по падению, можно поставить в соответствие имеющих такое же положение в пространстве сейсмогенные “слои” [Гусева и др., 1987; Лукк, Шевченко, 1986; 1990]. В то же время протяженных линейных сейсмических структур, маркирующих субвертикальные тектонические разломы, не наблюдается. Посмотрим, как это выглядит на Кавказе.

На рис. 1 приведена карта эпицентров коровых землетрясений с магнитудой 3 и более за 2000–2016 гг. на территории Кавказского перешейка между Черным и Каспийским морями и на смежных территориях и акваториях по данным стандартного каталога ISC. В первую очередь, отметим, что на этой карте не просматриваются выраженные линейные последовательности землетрясений, которые было бы естественно ожидать при генетической связи очагов землетрясений с круто наклоненными тектоническими разломами, особенно с субвертикальными, расположенными на границах блоков земной коры. Вместо этого преимущественно имеет место неравномерно рассеянное в плане положения эпицентров. В то же время обращает на себя внимание ряд пятен относительно изометричных или неправильной формы плотных скоплений эпицентров. Они располагаются непосредственно восточнее поднятия Терского и Сунженского хребтов в Восточном Предкавказье (I на рис. 1), в центральной части Главного хребта восточного сегмента Большого Кавказа (II на рис. 1), в восточной части Гаграджавской зоны Большого Кавказа (III на рис. 1), в пределах Севано-Акеринской ветви Анатолийско-Малокавказского офиолитового пояса и смежной части Самхето-Карабахского антиклинария Малого Кавказа к СЗ от оз. Севан (IV на рис. 1), т.е. в пределах весьма разнородных элементов тектонической структуры региона. Имеется несколько скоплений меньшего размера. Сходную картину

для рассматриваемой территории получили другие авторы [Бурмин и др., 2018; Уломов и др., 2007; Tan, Taymaz, 2006].

Нам представляется весьма вероятным, что эти скопления эпицентров землетрясений как таковые не приурочены к каким-либо конкретным разрывным нарушениям или их пересечениям, но, скорее, маркируют восходящие потоки глубинных флюидов, которые играют важную роль в процессах текто- и сейсмогенеза [Шевченко и др., 2011; 2017]. А сами конкретные разломы и цепочки тяготеющих к ним очагов землетрясений в пределах перечисленных скоплений очагов в масштабе карты оказываются неразличимыми. В пользу флюидной интерпретации скоплений очагов свидетельствует то, что “очаги коровых землетрясений, приуроченные к перечисленным эпицентральному пятнам, оказываются сосредоточенными в узких зонах, вытянутых практически в строго вертикальном направлении” [Бурмин и др., 2018, с. 44].

СКОПЛЕНИЕ ЭПИЦЕНТРОВ ГЛУБОКОФОКУСНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАВКАЗСКОГО ПЕРЕШЕЙКА

Одно из вышеупомянутых плотных скоплений эпицентров расположено, как уже упоминалось, непосредственно восточнее поднятия Терского и Сунженского хребтов (I на рис. 1). К этому скоплению приурочен эпицентр сильнейшего за рассматриваемый временной интервал корового землетрясения 11.10.2008 г. с $M_B = 5.6$ (с координатами $43^{\circ}25.3' \text{ с.ш.}$ и $46^{\circ}20.2' \text{ в.д.}$), с мощной афтершоковой последовательностью (его эпицентр выделен в пределах области I на рис. 1). Это скопление находится в северной краевой части более обширного поля с относительно меньшей плотностью эпицентров (знак 2 на рис. 1), которая (плотность), тем не менее, существенно превышает таковую на большей остальной части рассматриваемой территории. Этому полю по данным [Бурмин и др., 2018] соответствует достаточно обширная зона скопления коровых очагов в широком интервале глубин, которая имеет в целом вертикальные, но неясно выраженные ограничения.

К этому полю коровой сейсмичности приурочена также четко ограниченная область значительной концентрации очагов подкоровых землетрясений (рис. 2), которые на остальной территории наблюдаются только в виде единичных, разрозненных очагов с минимальной глубиной нахождения. Исключение представляет относительно обширное облако невысокой концентрации эпицентров подкоровых очагов, расположенное к юго-востоку от зоны их значительной концентрации (см. далее). В пределах области значительной концентрации эпицентров подкоровых землетрясений располагается г. Грозный,

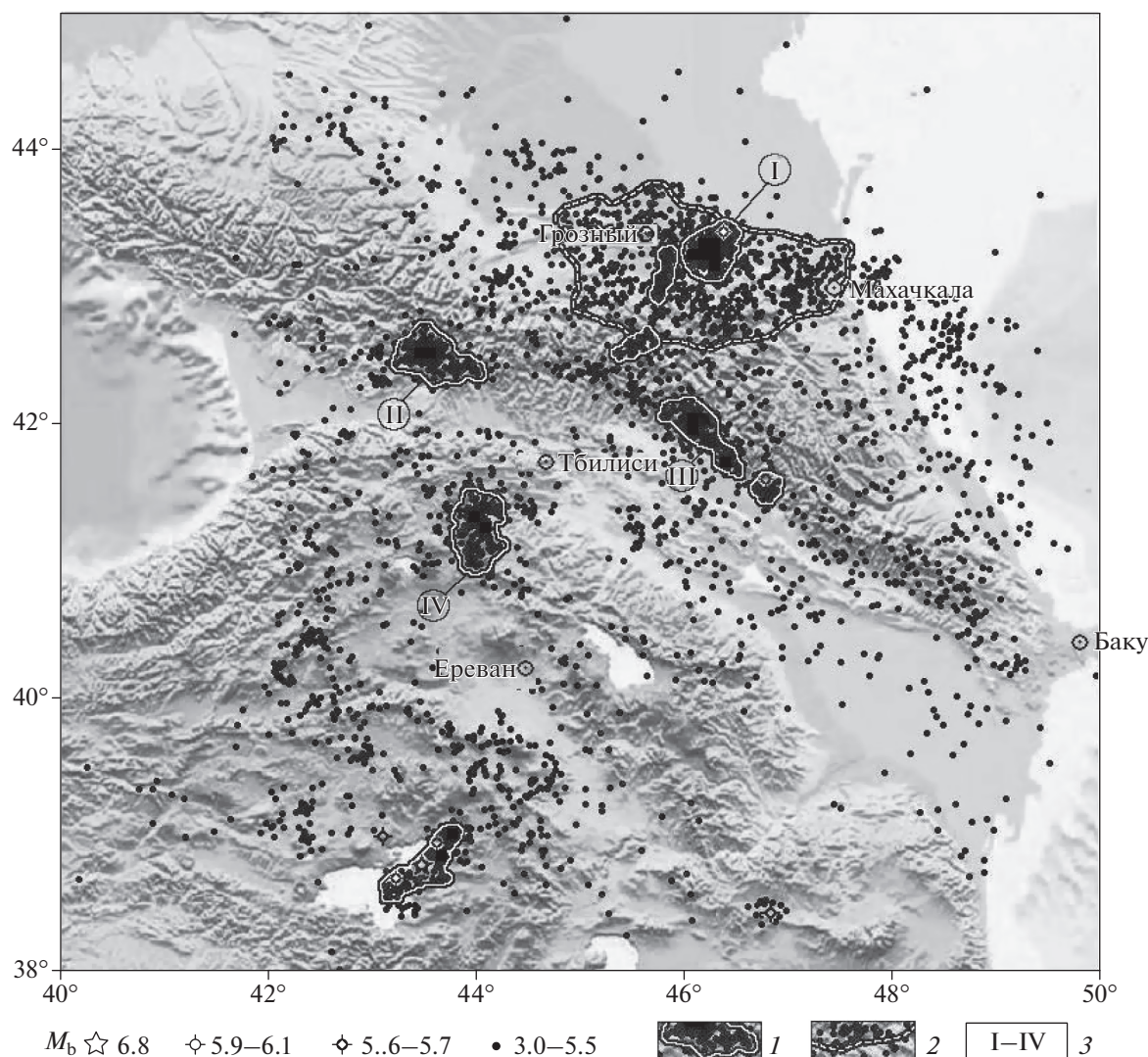


Рис. 1. Землетрясения с $M_b \geq 3$ на территории Кавказа за 2000–2016 гг. по данным стандартного каталога ISC. На фоне рассеянного распределения эпицентров землетрясений выделены скопления эпицентров с плотной их упаковкой (1) и достаточно обширная область с относительно менее плотной упаковкой к востоку от Терско-Сунженского поднятия (2); (3) – сеймотектонические области, упоминаемые в тексте.

поэтому в дальнейшем мы ее будем называть Грозненским сейсмогеном.

Сведения о глубоких, мантийных землетрясениях региона мы почерпнули из стандартного каталога Международного сейсмологического центра (ISC) за время 2000–2016 гг., когда в результате существенного увеличения плотности сети регистрирующих станций возросла точность определения глубин очагов землетрясений и, соответственно, надежность разделения мантийных и коровых сейсмических событий. Список подкоровых землетрясений за 2000–2016 гг., заимствованный нами из бюллетеня ISC (www.isc.ac.uk) в пределах области Кавказа с координатами 39–45° с.ш. и 44–50° в.д., приведен в табл. 1. При этом сейсмическое событие относилось к глубоким подкоровым, если большинство сейсмологи-

ческих служб (ISC, NEIC, MOS и др.) определяло для него глубину очага в 50 км и более. Максимальные глубины подкоровых землетрясений достигают здесь 160 км.

Осуществленная нами выборка широкофокусных, мантийных землетрясений в интервале глубин до 160 км и положение их эпицентров в пределах скопления в восточной части Кавказского перешейка приведены на рис. 2 с разделением по различным интервалам глубин по данным табл. 1. Очаги разных интервалов глубинности в пределах Грозненского сейсмогена четко дифференцированы на площади. Прежде всего отметим очаги с глубинами 50–75 км (граница М располагается на Кавказском перешейке на глубинах 40–45 км и только в осевой части Восточного Кавказа погружается до 50–55 км [Резанов, Шевченко, 1978]).

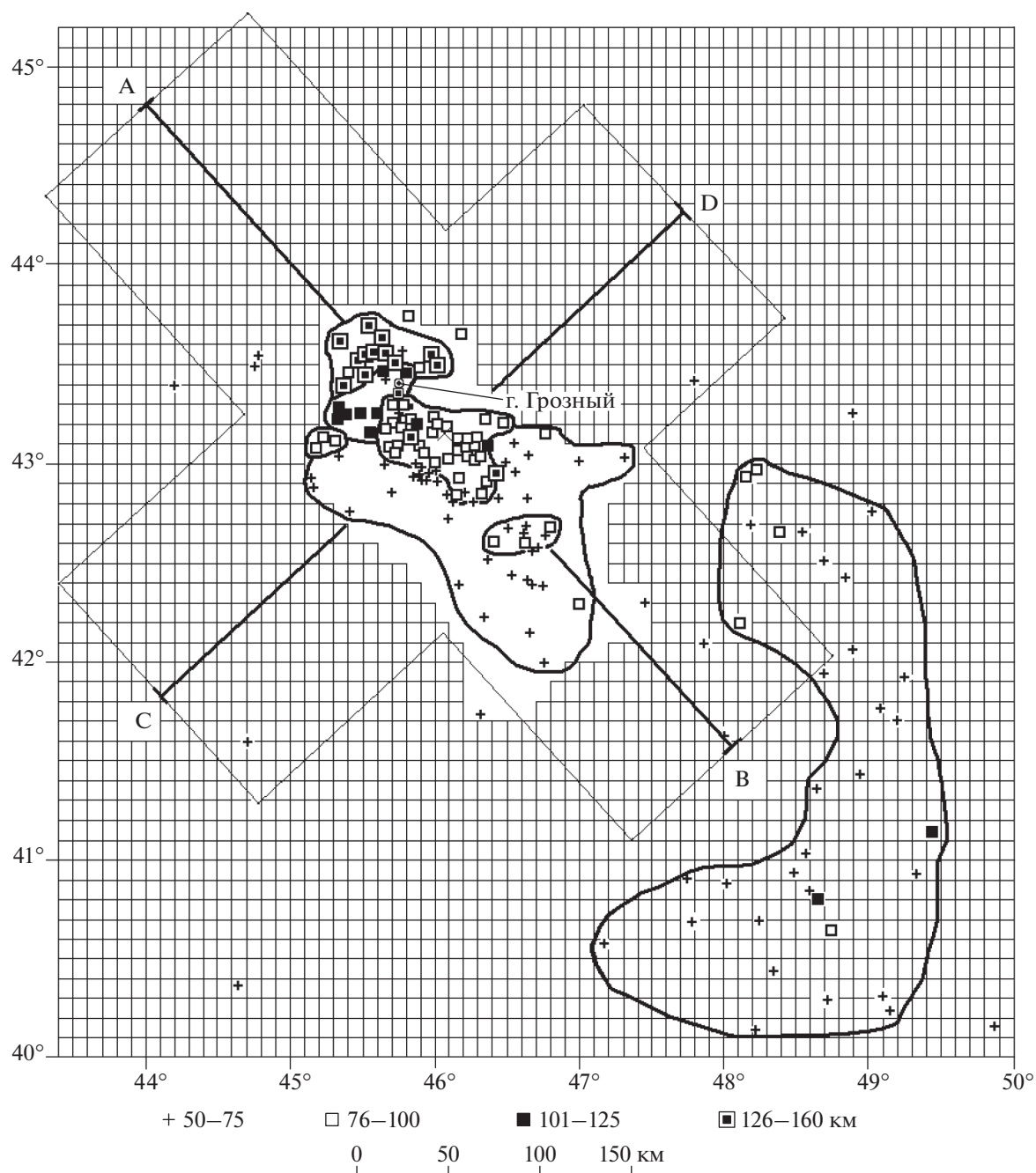


Рис. 2. Области распространения глубокофокусных, подкорковых землетрясений в восточной части Кавказского перешейка и в смежной части Каспийского моря. Контурами показаны границы областей распространения эпицентров подкорковых землетрясений с разной глубиной очагов, указанной под рисунком. А–В, С–D – линии сейсмологических профилей, показанных на рис. 3. Косым крестиком в центре области глубоких землетрясений обозначена точка пересечения этих двух линий.

Эти очаги образуют относительно обширное поле неправильной формы (назовем его “Основным полем”), удлинненное в направлении СЗ–ЮВ. Эпицентры очагов на глубинах 76–100 км слагают относительно небольшое плотное скопление овальной формы в северной половине Основного поля. Длинная ось этого скопления ориентирована так же, как и ось Основного поля. Далее к СЗ

располагается небольшая по площади группа эпицентров очагов из следующего интервала глубин 101–125 км. И, наконец, эпицентры очагов в интервале глубин 126–160 км образуют скопление, которое смещено еще дальше к СЗ (или к северу) от предыдущих.

Исходя из приведенных данных, можно говорить о том, что в районе г. Грозного имеется относительно

Таблица 1. Каталог глубоких, подкорových землетрясений восточной части Кавказского перешейка за 2000–2016 гг.

№/№	Дата	Время	Координаты эпицентра		H, км	m _B	Источник
			с.ш.	в.д.			
01	2000-03-21	14:07	39.9490	48.2300	59.7	5.0	NEIC
02	2000-04-22	08:46	42.0440	48.7080	62.9	4.8	NEIC
03	2000-06-09	16:10	41.8830	49.6310	71.1	4.2	NEIC
04	2000-11-25	18:09	40.2220	49.9350	51.0	5.6	ISC
05	2000-12-12	02:21	40.3330	49.5140	94.9	3.8	ISC
06	2000-12-14	15:45	42.0600	45.1090	52.9	3.6	NEIC
07	2001-02-18	15:30	42.7500	46.8210	82.8	4.6	NEIC
08	2001-04-21	14:48	43.1960	46.0450	78.0	3.1	ISC
09	2001-04-29	16:34	40.0590	48.5190	52.3	4.2	NEIC
10	2001-06-05	15:33	42.4720	48.6340	60.3	5.0	NEIC
11	2002-01-30	04:01	43.6490	45.6630	153.9	4.6	NEIC
12	2002-02-11	16:18	40.1020	50.2110	54.2	4.9	NEIC
13	2002-04-04	09:07	43.2250	45.7940	94.0	3.3	ISC
14	2002-06-02	03:26	40.2920	49.8900	66.0	4.3	NEIC
15	2002-12-04	09:38	43.4713	45.7903	74.0	3.4	ISC
16	2003-04-10	06:39	42.2800	48.7500	67.9	4.1	NEIC
17	2003-10-26	08:09	43.1164	46.1882	91.0	4.0	ISC
18	2003-12-28	05:41	42.9500	48.4350	77.2	4.0	NEIC
19	2004-07-04	19:33	43.0015	45.6588	54.3	3.3	ISC
20	2004-07-06	15:15	43.5566	45.5954	141.2	3.8	ISC
21	2004-07-23	03:18	43.4574	45.5376	127.3	3.4	ISC
22	2004-08-05	07:46	43.2249	45.8392	85.8	3.7	ISC
23	2004-09-08	20:21	43.3943	45.3862	133.0	3.7	ISC
24	2004-11-16	14:17	42.8473	46.1885	80.1	3.8	ISC
25	2004-12-03	22:29	42.6310	46.6770	63.4	3.5	NEIC
26	2005-06-03	14:31	40.8600	49.7870	76.0	3.6	NEIC
27	2005-08-05	00:07	43.6593	46.1924	99.1	4.0	ISC
28	2005-08-25	10:24	40.4814	48.5938	71.0	4.1	NEIC
29	2005-11-18	21:24	43.4946	45.8952	123.5	3.5	ISC
30	2006-08-17	05:43	43.2385	45.4101	104.8	3.8	ISC
31	2006-10-12	21:16	43.6979	45.5553	149.3	4.6	ISC
32	2006-11-17	05:28	40.7090	48.4330	54.6	3.4	NEIC
33	2006-11-21	17:12	43.5334	45.9757	129.8	4.4	ISC
34	2006-12-06	22:10	43.4956	45.9007	117.4	4.0	ISC
35	2007-04-07	05:37	42.1917	48.1271	105.3	4.2	ISC
36	2007-06-08	05:54	40.7800	47.8930	58.2	3.9	NEIC
37	2007-07-24	13:41	42.0100	48.8820	66.5	4.7	NEIC
38	2007-08-05	10:52	43.4658	45.8233	120.3	3.6	ISC
39	2007-10-22	20:10	43.0959	46.2490	83.3	4.3	ISC
40	2008-07-14	03:04	40.5630	48.0840	60.9	3.6	NEIC
41	2008-11-19	00:15	43.2175	45.8877	107.5	3.9	ISC
42	2008-12-28	03:57	40.0910	49.3320	63.6	3.7	NEIC
43	2009-07-20	22:35	43.4000	47.7780	59.5	3.9	NEIC
44	2009-08-02	13:46	43.2588	45.6182	113.5	4.1	ISC
45	2009-12-04	14:25	41.8942	49.2439	81.9	3.9	ISC
46	2010-02-05	14:04	42.8406	46.0959	82.9	3.9	ISC
47	2010-02-18	22:59	43.0669	46.1860	88.3	3.2	ISC
48	2010-02-23	16:36	43.0920	46.3467	102.3	4.4	ISC
49	2010-04-20	18:16	41.7972	49.0429	79.8	3.5	ISC
50	2010-05-25	05:38	43.0280	46.2640	88.3	4.0	ISC
51	2010-10-01	16:16	43.2868	45.7115	99.8	3.9	ISC

Таблица 1. Окончание

№/№	Дата	Время	Координаты эпицентра		H, км	m _B	Источник
			с.ш.	в.д.			
52	2010-11-20	01:05	41.8430	49.0000	59.9	3.7	NEIC
53	2010-12-21	07:41	41.9356	48.7069	81.1	3.4	ISC
54	2011-01-17	09:15	43.4318	45.6712	119.8	3.8	ISC
55	2011-01-26	14:04	43.5115	46.0038	133.7	3.9	ISC
56	2011-02-28	10:54	40.9980	47.8310	60.0	4.3	NEIC
57	2011-05-12	11:33	43.2509	45.5110	99.2	4.0	ISC
58	2011-06-28	18:56	43.1298	45.2337	89.1	4.4	ISC
59	2011-07-08	17:23	43.5201	45.5024	158.1	4.0	ISC
60	2011-09-06	04:13	43.1626	46.0037	95.1	4.2	ISC
61	2011-12-04	18:29	43.1942	45.8013	93.4	3.9	ISC
62	2012-05-12	10:53	43.2176	46.0072	81.1	4.0	ISC
63	2012-05-15	00:00	43.0324	46.3186	80.3	4.0	ISC
64	2012-06-02	00:32	43.1301	46.2965	89.2	4.5	ISC
65	2012-11-21	02:15	42.8554	46.2185	60.7	3.6	ISC
66	2012-12-09	22:15	43.2050	45.6533	107.8	3.4	ISC
67	2013-01-24	11:00	42.8073	46.1413	70.0	3.5	ISC
68	2013-02-24	17:04	42.8505	46.3320	88.6	3.8	ISC
69	2013-03-22	15:14	42.9924	46.0139	82.1	3.9	ISC
70	2013-03-31	07:02	42.6940	46.7980	52.2	4.6	NEIC
71	2013-04-17	01:36	43.5443	45.6176	148.3	3.6	ISC
72	2013-04-29	14:26	42.6063	46.4107	75.9	3.3	ISC
73	2013-05-18	19:12	42.9117	46.3686	84.2	3.6	ISC
74	2013-05-30	06:50	42.9445	45.9712	75.5	3.5	ISC
75	2013-05-30	19:24	43.0163	46.0986	93.3	3.8	ISC
76	2013-07-02	20:53	43.2538	45.6249	106.9	3.5	ISC
77	2013-08-15	11:11	43.0756	45.7062	78.9	4.2	ISC
78	2013-09-03	18:50	43.1638	45.5689	107.0	3.6	ISC
79	2013-09-14	15:35	43.2672	45.3523	112.8	3.8	ISC
80	2013-10-03	03:34	43.0842	45.1737	90.9	3.7	ISC
81	2014-01-10	00:45	41.9129	49.5026	66.3	4.7	NEIC
82	2014-01-11	14:49	43.0668	46.6690	73.4	3.7	ISC
83	2014-02-10	12:06	40.2880	48.8033	64.7	5.6	NEIC
84	2014-05-21	20:58	42.9080	46.0250	53.0	3.6	ISC
85	2014-09-13	01:13	42.9413	45.8597	74.9	4.1	ISC
86	2014-10-02	12:24	43.1377	46.3251	101.0	3.9	ISC
87	2014-12-31	14:40	43.0161	45.9576	71.5	3.7	ISC
88	2015-01-05	11:21	43.0530	45.7330	84.0	4.0	ISC
89	2015-02-26	03:45	43.1970	46.0700	94.8	3.5	ISC
90	2015-07-03	14:12	42.9178	45.8968	74.7	3.5	ISC
91	2015-08-07	22:53	43.0907	45.8107	81.5	3.6	ISC
92	2015-08-29	13:43	43.0396	46.0479	82.6	3.9	ISC
93	2015-09-12	02:08	43.6280	45.6470	139.0	4.0	ISC
94	2016-02-03	17:05	43.8402	45.7628	125.0	4.2	NEIC
95	2016-05-13	21:17	42.9400	46.6300	60.5	5.0	NEIC
96	2016-05-29	05:44	43.1100	46.2500	80.0	4.1	MOS
95	2016-08-08	17:25	43.0900	45.7600	80.0	4.0	MOS
98	2016-09-16	02:52	42.9100	45.9400	70.0	3.4	MOS
99	2016-09-18	13:20	43.2900	45.8000	115.0	3.3	MOS

Примечание: жирными номерами указаны события, использовавшиеся для построения рис. 3 (см. далее).

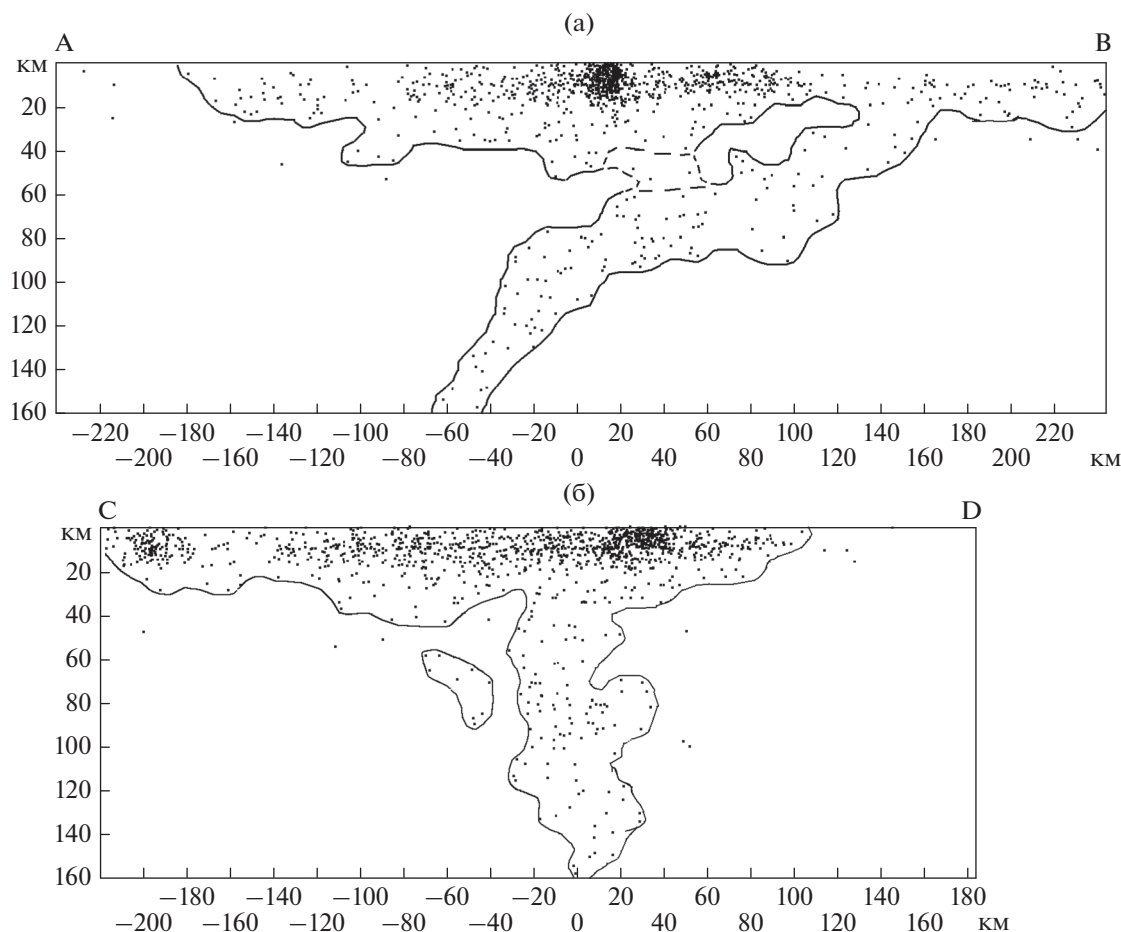


Рис. 3. Профили через область глубокофокусных землетрясений Грозненского сейсмогена, ориентированные близпараллельно простиранию сейсмогена (а) и вкрест простирания (б). На плоскости профилей спроецированы все очаги землетрясений из полос, для которых линии А–В и С–D являются осявыми. Положение линий профилей и ширина полос выборки гипоцентров землетрясений показаны на рис. 2. Отсчет расстояний на профилях ведется от точки их пересечения (косой крестик на рис. 2): направо – положительные значения, налево – отрицательные.

небольшой по площади, прослеживающийся до глубины около 160 км, сейсмогенный объем пород верхней мантии, имеющий форму столба, наклоненного в СЗ направлении.

Кроме рассмотренного поля глубоких землетрясений в районе г. Грозного (т.е. Грозненского сейсмогена), имеется упомянутое выше расположенное к ЮВ от него более обширное поле серповидной в плане формы (“Серповидное поле”) (рис. 2). В пределах этого поля преобладают эпицентры землетрясений с глубинами 50–75 км. Имеются лишь отдельные разрозненные эпицентры землетрясений с глубинами 76–125 км. Мы не исключаем, что эти “глубокие” землетрясения могли появиться за счет возможных ошибок в определении глубин очагов коровых землетрясений при неблагоприятном в целом для этой относительно удаленной от сети станций области в расположении регистрирующих станций. Этот вопрос был подробно рассмотрен нами в работе [Лукк, Шевченко, 2019]. Поэтому к факту реаль-

ного существования этих глубоких землетрясений в Серповидном поле следует относиться с большой осторожностью.

На рис. 3 приведены два вертикальных профиля через область глубоких землетрясений Грозненского сейсмогена: А–В – продольный относительно поля распространения таких очагов и С–D – поперечный к простиранию поля. На плоскости профилей спроецированы все очаги землетрясений из полос, для которых линии А–В и С–D являются осявыми. Ширина полос 152 и 164 км соответственно. Она выбиралась таким образом, чтобы на обоих профилях охватить основное скопление эпицентров глубоких землетрясений.

В целом в районе Грозненского сейсмогена сейсмическое поле разделяется на две части. Это, во-первых, те землетрясения, очаги которых распределены преимущественно в верхних слоях (рис. 3а, 3б). Вниз по разрезу коры, до глубин 30–40 км (максимум до 50 км на очень ограниченной

площади) плотность распределения очагов существенно уменьшается. Здесь присутствует наиболее сильное за рассматриваемый период времени коровое землетрясение с $M_B = 5.6$. Во-вторых, это упомянутое, необычное для всей рассматриваемой территории в целом, четко локализованное скопление глубоких землетрясений в районе г. Грозного на глубинах от 50 до 160 км.

В пределах продольного профиля А–В (рис. 3а) мантийные очаги концентрируются на глубинах ~50–90 км в пределах довольно узкой слабо наклоненной полосы (около 40 км в поперечнике). Вниз по падению происходит увеличение наклона этой полосы до ~50–60° с уменьшением ее ширины на больших глубинах до ~20 км. Вверх по восстанию в диапазоне глубин 30–50 км наклон полосы концентрации очагов землетрясения составляет около 30°. Далее вверх эта наклонная полоса сливается с горизонтальным приповерхностным “слоем” очагов коровых землетрясений.

В целом можно считать, что рассмотренная полоса очагов глубоких землетрясений наклонена к горизонту примерно на 30° к СЗ. Следует заметить, что осевая линия расположенной рядом периклинальной части Сунженской антиклинали погружается в противоположном, ЮВ направлении.

На поперечном профиле С–D (рис. 3б) проекции гипоцентров глубоких землетрясений вырисовывают приблизительно близвертикальную полосу. Ширина полосы – ~40–60 км. Вверху она сливается с горизонтальным “слоем” коровой сейсмичности.

Таким образом, в поперечном сечении рассматриваемый Грозненский сейсмоген имеет форму, близкую к овалу, а в целом “сейсмогенное тело” выглядит как наклонный стержень, столб не слишком правильной формы.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ГРОЗНЕНСКОГО СЕЙСМОГЕНА

Обратимся к характеристике напряженно-деформированного состояния верхней мантии в области существования глубоких, мантийных землетрясений. Его оценка производилась по данным о фокальных механизмах землетрясений. Известных определений таковых оказалось немного в рамках упомянутого выше временного интервала 2000–2016 гг. в силу малых магнитуд мантийных землетрясений. Поэтому мы вышли за его пределы и постарались использовать все известные определения фокальных механизмов на рассматриваемой территории Грозненского сейсмогена. Нам удалось организовать небольшую статистику фокальных механизмов глубоких землетрясений, сведения о которых удалось отыскать в бюллетенях ISC и NEIC, а также в публика-

ции И.П. Габсатаровой с коллегами [2016]. Эти сведения приведены в табл. 2. Будем называть в дальнейшем эту выборку выборкой А.

Интерес представляет сравнительная оценка напряженно-деформированного состояния рассматриваемой территории в земной коре и верхней мантии. С этой целью мы дополнительно к выборке А фокальных механизмов глубоких, мантийных землетрясений воспользовались выборкой фокальных механизмов для коровых землетрясений в области (с координатами 42°–44° с.ш. и 44°–48° в.д.), расположенной над областью сгущения мантийных землетрясений (см. рис. 2). В дальнейшем эту выборку фокальных механизмов будем называть выборкой В. Эти данные приведены в табл. 3. В обеих таблицах (табл. 2 и табл. 3) номера событий для фокальных механизмов, заимствованных из работы [Габсатарова и др., 2016], выделены жирным шрифтом.

В табл. 2 приведены фокальные механизмы для подкоровых землетрясений с глубинами более 50 км в Грозненском сейсмогене. Кроме того, мы привлекли также 3 события в нижней коре ($H = 35–48$ км), фокальные механизмы которых близки по виду к механизмам мантийных землетрясений. Нам представляется это допустимым в силу приведенных выше рассуждений о возможных ошибках определения глубин очагов землетрясений в нижней части коры. Однако это сходство механизмов может быть интерпретировано также как указание на возможность проникновения в некоторых случаях глубинного подвижного материала (флюиды и т.п., с которыми мы связываем возникновение мантийных землетрясений) на нижнекоровый уровень.

Графические решения приведенных в табл. 2 фокальных механизмов (СМТ-решения) глубоководных, мантийных землетрясений показаны на рис. 4, а на рис. 5 приведены графические решения фокальных механизмов (СМТ-решения) для коровых землетрясений согласно данным табл. 3.

Реконструкция напряженно-деформированного состояния (НДС) в подкоровом слое и в пределах земной коры осуществлялась по рассмотренным выше данным о фокальных механизмах расположенных в них землетрясений путем построения среднего механизма по совокупностям индивидуальных фокальных механизмов землетрясений в пределах каждой конкретной выборки в рамках методики С.Л. Юнги [1979; 1990]. Ее основным элементом является построение матрицы среднего механизма M_{ij} , определяемой как среднее арифметическое из совокупностей N -матриц индивидуальных фокальных механизмов m_{ij} :

$$M_{ij} = (\sum_{\alpha=1}^N m_{ij}^{\alpha}) / N.$$

При этом принималось допущение о подобии напряженно-деформированного состояния в ши-

Таблица 2. Фокальные механизмы (СМТ решения) подкорковых землетрясений Грозненского сейсмогена

№/№	Дата	Координаты эпицентра		Гл. <i>h</i> , км	Маг. <i>m_B</i>	Ориентация главных осей фокальных механизмов					
		с.ш., град	в.д., град			<i>p</i>		<i>t</i>		<i>b</i>	
						Azm	α	Azm	A	Azm	A
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
01	1993-08-31	41.44	49.29	82	5.2	166	17	052	54	267	31
02	2000-03-21	40.03	48.12	78	5.0	080	52	186	12	285	35
03	2000-04-22	42.03	48.42	87	4.6	266	36	020	30	139	40
04	2001-02-18	42.40	46.48	91	4.5	161	77	322	13	053	04
05	2001-06-05	42.25	48.42	48	5.0	258	08	349	11	133	76
06	2002-01-30	43.45	45.49	96	4.5	075	60	195	16	293	25
07	2002-02-11	40.02	50.11	57	4.8	229	64	028	24	122	08
08	2003-10-26	43.07	46.11	91	4.0	029	41	251	41	140	23
09	2004-07-06	43.34	45.36	141	3.8	244	32	357	32	121	41
10	2004-08-05	43.13	45.50	86	3.7	120	70	210	00	300	20
11	2005-03-13	40.19	45.52	35	4.5	240	59	344	08	078	29
12	2005-11-18	43.29	45.54	124	3.5	339	40	222	28	108	37
13	2006-10-12	43.42	45.33	149	4.6	006	32	265	16	153	51
14	2007-08-05	43.28	45.49	120	3.6	222	76	352	09	084	10
15	2009-05-17	43.18	46.07	48	4.4	334	61	168	25	081	14
16	2012-10-07	40.45	48.26	35	5.4	063	78	203	10	294	08
17	2014-02-10	40.08	48.47	70	5.6	075	37	186	25	301	42
18	2016-02-03	43.33	45.34	150	4.2	288	53	018	00	108	37
19	2016-05-13	43.06	46.33	70	5.3	005	69	150	18	243	12

Примечание: решения даны для нижней полусферы; ориентацию главных осей фокальных механизмов *p*, *t*, *b* (сжатия, растяжения и промежуточного напряжений) определяют углы наклона с горизонтом — α и азимуты простираения — Azm в градусах. Гипоцентральные данные и магнитуды даны по ISC бюллетеню. Жирным шрифтом помечены номера сейсмических событий, заимствованных из работы [Габсатарова и др., 2016].

роком диапазоне магнитуд. Правомочность такого допущения подкреплялась теоретическими соображениями [Никитин, Юнга, 1977] и проверялась в натурном эксперименте в диапазоне магнитуд $M = 1-5$ в [Юнга, 1979; Лукк, Юнга, 1979; 1988]. В отличие от обычного разделения знаков первых вступлений *P*-волн на поверхности фокальной сферы двумя нодальными плоскостями средний механизм требует разделения этих знаков (или главных осей тензоров СМТ-решений) поверхностью эллиптического конуса, описываемой уравнением:

$$M_{ij}X_iX_j = 0.$$

Положение и форма эллиптического конуса полностью определяются положением главных осей *T* (растяжение), *B* (промежуточная), *P* (сжатие), соответствующих собственным значениям M_1, M_2, M_3 ($M_1 \geq M_2 \geq M_3$; $M_1 + M_2 + M_3 = 0$) симметричного тензора-девиатора 2-го ранга M_{ij} , и коэффициентом Лоде–Надаи μ_M . Значения ко-

эффициента μ_M выражаются через собственные значения M_1, M_2, M_3 как:

$$\mu_M = 3M_2 / (M_1 - M_3).$$

Коэффициент μ_M используется в дальнейшем для характеристики вида напряженно-деформированного состояния: его значения изменяются от -1 (растяжение/одноосное удлинение) до $+1$ (сжатие/одноосное укорочение) через 0 (чистый скол).

Для оценки соответствия расчетного среднего механизма совокупности индивидуальных механизмов, на основе которой он построен, используется второй инвариант тензора M_{ij} , который мы обозначаем как интенсивность *k*:

$$k = \sqrt{2(M_1^2 + M_2^2 + M_3^2)}.$$

Величина коэффициента *k* изменяется от 1 (в случае полного совпадения всех индивидуальных фокальных механизмов (СМТ-решений)) до 0 (в

Таблица 3. Фокальные механизмы (СМТ решения) коровых землетрясений на территории Грозненского сейсмогена

№/№	Дата	Координаты эпицентра		Гл. <i>h</i> , км	Маг. <i>m_B</i>	Ориентация главных осей фокальных механизмов					
		с.ш., град	в.д., град			<i>p</i>		<i>t</i>		<i>b</i>	
						Azm	α	Azm	α	Azm	α
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1976-07-28	43.11	45.34	15	6.2	016	30	196	60	286	00
2	1981-10-18	43.19	45.19	33	4.9	009	15	134	65	273	19
3	1985-07-04	42.09	45.48	33	5.2	165	40	013	47	267	14
4	1988-05-03	42.29	47.41	29	5.1	037	29	218	61	127	00
5	1989-08-03	43.34	45.22	25	5.0	194	03	075	83	285	06
6	1991-04-29	42.25	43.40	17	6.2	186	07	311	77	095	10
7	1991-04-29	42.31	43.53	10	6.2	161	04	276	80	070	09
8	1991-05-03	42.40	43.15	01	5.3	200	04	299	64	108	26
9	1991-06-15	42.26	44.01	09	6.1	079	05	341	56	173	33
10	1991-07-04	42.23	44.08	12	5.0	082	10	318	72	175	15
11	1992-10-23	42.40	45.01	15	6.4	166	37	325	51	068	10
12	1997-11-27	42.52	45.22	30	5.3	351	10	105	68	257	20
13	1999-01-316	43.15	46.55	35	5.8	038	14	262	71	132	13
14	1999-02-21	43.16	46.55	33	5.1	034	15	262	68	129	15
15	2000-09-24	42.28	47.22	33	4.6	059	01	152	63	329	27
16	2002-11-24	43.13	47.05	10	4.2	016	20	171	69	283	08
17	2004-07-30	43.46	43.58	10	4.7	346	11	256	00	166	79
18	2005-01-07	43.30	44.58	25	4.4	004	01	261	86	094	04
19	2006-02-06	42.39	43.30	23	5.2	214	16	351	68	119	14
20	2008-10-11a	43.25	46.20	12	5.6	002	05	112	82	275	07
21	2008-10-11b	43.23	46.14	15	5.2	005	02	112	82	275	07
22	2010-06-09	43.32	45.31	19	4.4	185	29	064	43	297	33
23	2013-09-17	42.09	45.49	05	5.3	186	36	345	53	089	10
24	2014-04-14	43.35	44.09	04	4.2	017	36	232	48	121	18
25	2014-04-27	43.01	45.53	13	4.7	035	31	163	46	286	28
26	2014-06-02	43.33	45.29	10	4.8	348	77	173	13	082	01
27	2014-11-24	43.06	45.51	10	4.6	354	12	124	71	261	14

Примечание: решения даны для нижней полусферы; ориентацию главных осей фокальных механизмов *p*, *t*, *b* определяют углы наклона с горизонтом — α и азимуты простирания — Azm в градусах. Гипоцентральные данные и магнитуды даны по ISC бюллетеню. Жирным шрифтом помечены номера сейсмических событий, заимствованных из работы [Габсатарова и др., 2016].

случае, когда каждому индивидуальному СМТ-решению в выборке находится его антипод). Надо заметить, что при случайном распределения главных осей индивидуальных СМТ-решений параметр *k* принимает значения, не превышающие 0.3. Поэтому, при значениях $k \geq 0.5$ оценка среднего фокального механизма представляется устойчивой.

Рассчитанные таким образом средние механизмы в пределах пространственных выборок А и В приведены на рис. 6. Численные параметры

приведенных на этом рисунке средних тензоров СТД отражены в табл. 4.

Как следует из рис. 6 и табл. 4, средние механизмы глубокофокусных и коровых землетрясений принципиально различаются. Их главные оси *P* и *T* ориентированы противоположным друг к другу образом. Различаются они и коэффициентами Лоде–Надаи (μ_M). В мантии в Грозненском сейсмогене отмечается слабое преобладание субгоризонтального растяжения ($\mu_M = -22$) в

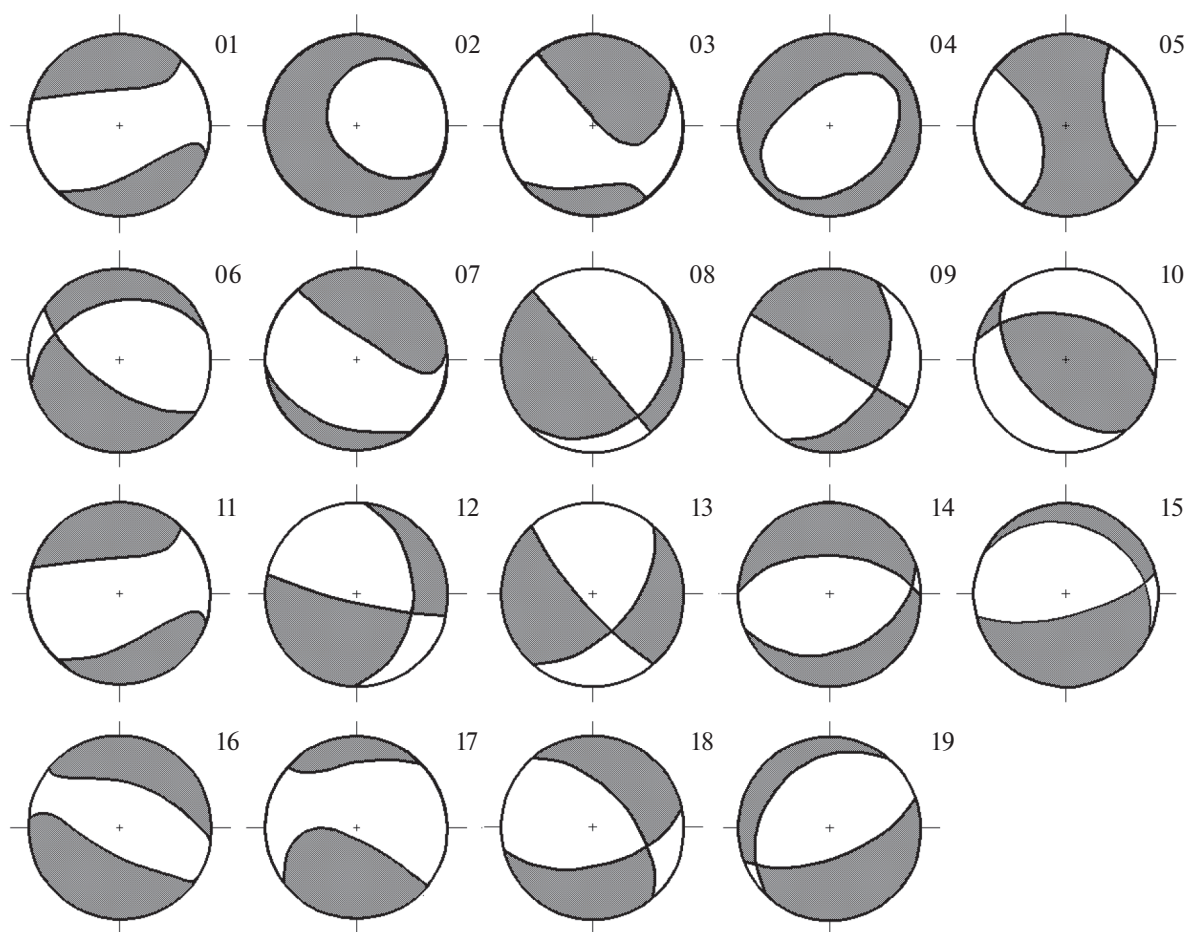


Рис. 4. Графические решения фокальных механизмов глубокофокусных, подкорových сейсмических событий Грозненского сейсмогена согласно данным табл. 2.

близмеридиональном направлении при субвертикальном положении оси сжатия. В то же время в земной коре преобладает напряженное состояние субгоризонтального сжатия ($\mu_M = +0.16$) в близмеридиональном направлении при субвертикальном положении оси растяжения. То есть, в противовес обстановке надвигообразования в земной коре (В), в подкоровой мантии в Грозненском сейсмогене (А) преобладает сбросовый тип напряженно-деформированного состояния. Если вид напряженно-деформированного состояния, оцененный здесь в пределах земной коры, согласуется с общепринятым представлением о том, что напряженно-деформированное состояние на Кавказском перешейке определяет напряжение интенсивного субгоризонтального сжатия, ориентированное вкост простирания тектонических структур, то для подкорового сейсмогена этот механизм не проходит. Необходимо отметить, что полученные здесь данные о напряженном состоянии горных пород Грозненского сейсмогена на больших глубинах характеризуют

только сам сейсмоген. Их вряд ли можно механически распространять на вмещающую этот сейсмоген мантию.

Природа напряженного состояния Грозненского сейсмогена, существенно отличающегося от такового для земной коры, пока не находит у нас какого-либо объяснения. В связи с этим стоит также заметить, что напряженное состояние материала литосферы в некоторых других сейсмогенах (Вранчский, Гармский) [Шевченко и др., 2011; 2017] выглядит отлично от того, что получено здесь нами для Грозненского сейсмогена.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Положение выделенных на рис. 2 полей очагов глубокофокусных, мантийных землетрясений продублировано на рис. 7 на фоне орографической карты района и коровой сейсмичности.

Находящиеся на СЗ окончании Грозненского сейсмогена эпицентры наиболее глубокофокусных землетрясений располагаются севернее Тер-

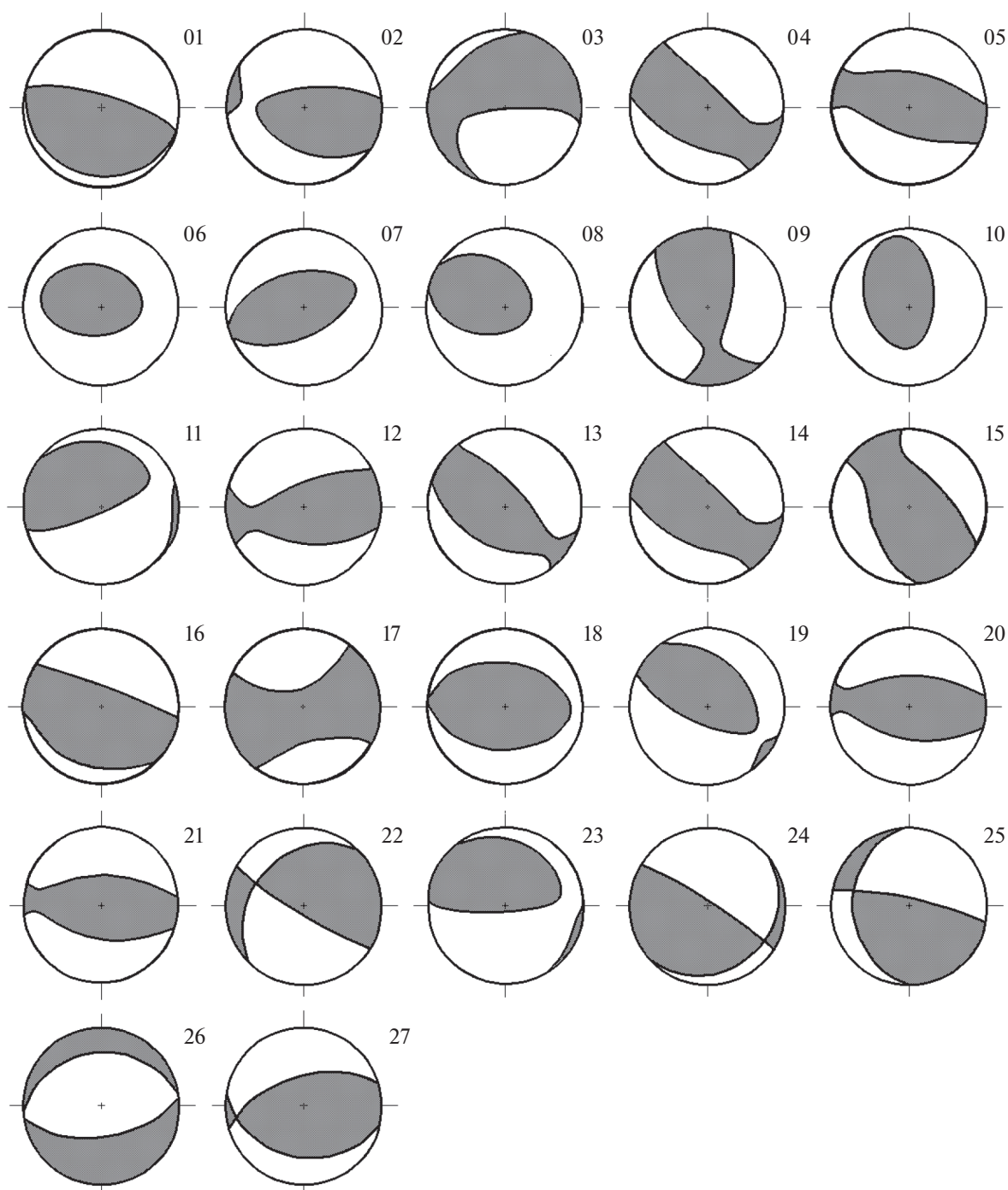


Рис. 5. Графические решения фокальных механизмов коровых сейсмических событий в выборке над областью глубоких мантийных землетрясений согласно данным табл. 3.

ского хребта Восточного Предкавказья, т.е. за пределами Восточного Предкавказья. Они попадают на территорию “молодой” Скифской платформы – эпибайкальской, по мнению М.В. Муратова [1969] или, возможно, представляющей несколько опущенную, прогнутую краевую часть древней Восточно-Европейской платформы [Ре-

занов и др., 1978]. ЮВ часть Основного поля Грозненского сейсмогена протягивается в пределы северного крыла осевого поднятия Большого Кавказа (в пределы Дарьяло-Богосского антиклинория или горст-антиклинория Бокового хребта восточного сегмента этого мегантиклинория [Милановский, Хаин, 1963]). Судя по более

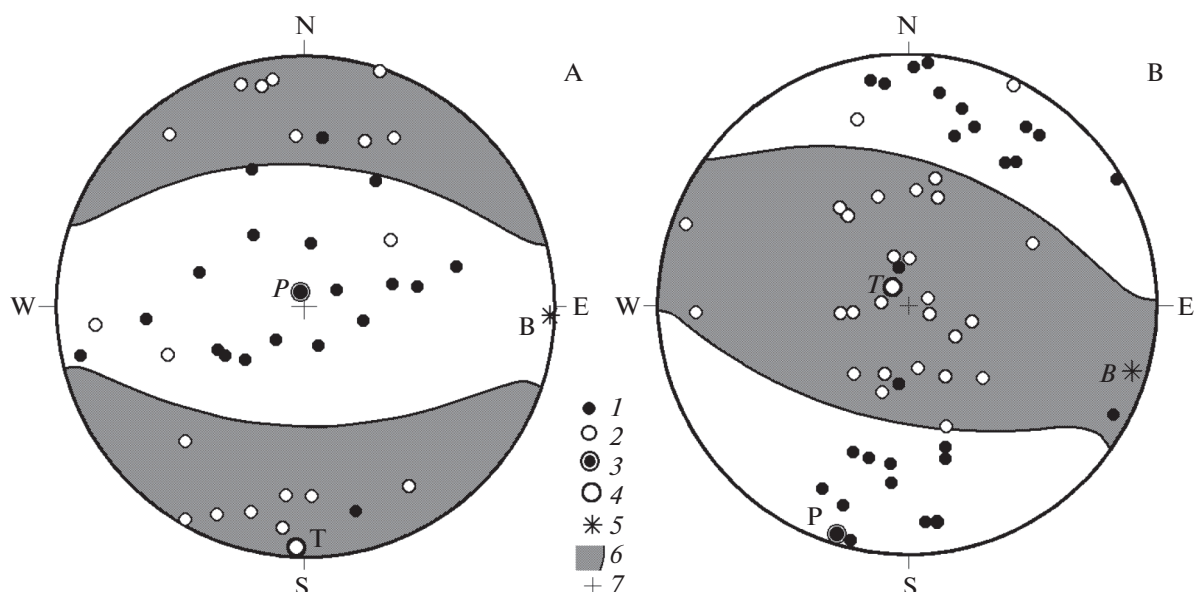


Рис. 6. Средние фокальные механизмы для глубокофокусных подкорковых землетрясений (выборка А) и для коровых землетрясений (выборка В) на территории Грозненского сейсмогена: 1 – индивидуальные оси сжатия напряженно-деформированного состояния (НДС); 2 – индивидуальные оси растяжения СТД; 3 – расчетные главные оси сжатия среднего фокального механизма; 4 – расчетные главные оси растяжения среднего фокального механизма; 5 – расчетные главные оси промежуточной СТД среднего фокального механизма; 6 – проекция нодальной поверхности и ограничиваемая ею область растяжения СТД; 7 – центр стереографической проекции.

поздним данным [Гущин, Панов, 1992; Гущин и др., 1996], в Боковом хребте вскрывается фронтальная часть мощной сложной южновергентной надвиговой пластины нижнеюрских песчано-сланцевых пород [Шевченко и др., 2017].

Располагающееся юго-восточнее Грозненского сейсмогена Серповидное поле перекрывает юго-восточный сегмент Большого Кавказа и включает в себя смежные части Каспийского моря и Куринской межгорной впадины. Серповидное поле в принципе может быть, наряду с Грозненским сейсмогеном, включено в состав Восточно-Кавказской полосы глубинной сейсмичности. Эта полоса как целое (простираение СЗ-ЮВ) в плане сечет под острым углом восточную часть Большого

Кавказа. Особенно наглядно Грозненский сейсмоген с его СЗ-ЮВ простираением сечет различные субширотные элементы тектонической структуры северного склона восточного сегмента Большого Кавказа и Восточного Предкавказья. Каркие-либо тектонические дислокации (см. [Барковская и др., 1960; Геология СССР, 1968; 1972]), которые можно было бы соотнести с Грозненским сейсмогеном или с упомянутой Восточно-Кавказской полосой глубинной сейсмичности, отсутствуют.

Глубокофокусные, мантийные очаги землетрясений в восточной части Кавказского перешейка и некоторые другие геологические и геофизические данные по этому региону рассматри-

Таблица 4. Расчетные параметры среднего фокального механизма для землетрясений на территории Грозненского сейсмогена за период 1976–2016 гг.

N	P		T		B		μ_M	k
	Azm	α	Azm	α	Azm	α		
A: 19	245°	87°	358°	01°	088°	03°	-0.2155	0.3291
B: 27	197°	04°	320°	83°	106°	06°	+0.1601	0.4168

Примечание: N – индекс выборки (A, B) и число индивидуальных механизмов в ней; Azm и α – азимут и угол наклона (с горизонтом) главных осей укорочения (сжатия) P, удлинения (растяжения) T и промежуточной сеймотектонической деформации B; μ_M – коэффициент Лоде–Надаи ($-1 \leq \mu_M \leq 1$); k – показатель внутренней сходимости оцениваемых данных ($0 \leq k \leq 1$). A – выборка фокальных механизмов мантийных землетрясений в Грозненском сейсмогене согласно табл. 2 (40–44° с.ш. и 45–50° в.д.).

B – выборка фокальных механизмов в земной коре над областью глубоких мантийных землетрясений в Грозненском сейсмогене согласно табл. 3 (42–44° с.ш. и 43–48° в.д.).

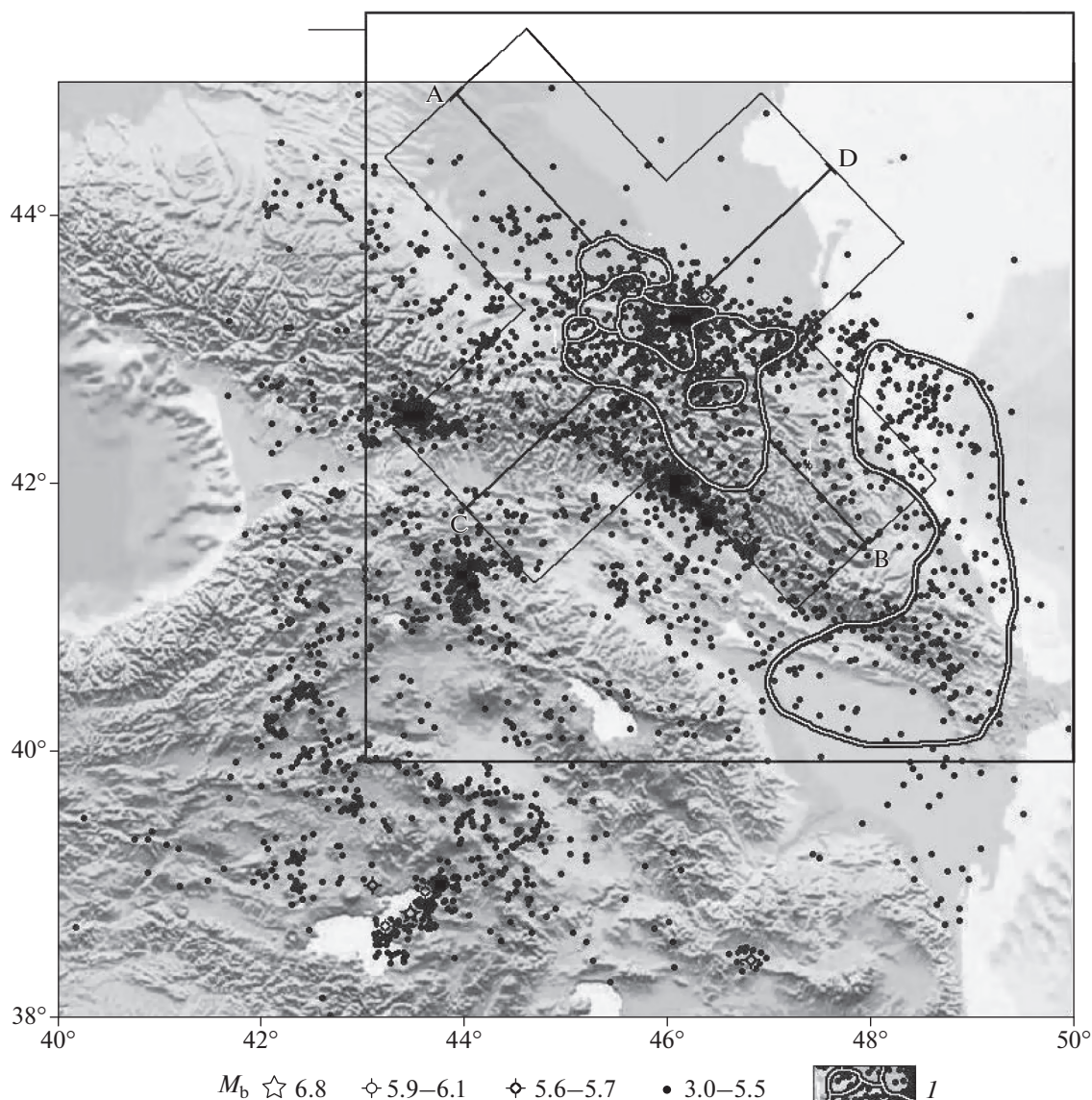


Рис. 7. Местоположение полей эпицентров мантийных землетрясений восточной части Кавказского перешейка и смежной части Каспийского моря для четырех интервалов глубин очагов в диапазоне 50–160 км в соответствии с их распределением на рис. 2 (знак 1). А–В – линия вертикального профиля через область Грозненского сейсмогена, ориентированная вдоль его длинной оси (в направлении ЮВ–СЗ) (см. рис. 3а). С–D – линия вертикального профиля через область Грозненского сейсмогена, ориентированная поперек его длинной оси (в направлении ЮЗ–СВ) (см. рис. 3б).

ваются рядом исследователей как свидетельство существования здесь слэба располагающейся южнее Аравийской литосферной плиты, субдуцирующей в северном направлении, под Большой Кавказ [Гугунава, 1976; Кропоткин, Ларионов, 1976; Хаин, 1982; 1984; Халилов и др., 1987]. С этим субдуцированием связывают формирование тектонической структуры Кавказа и завершение развития соответствующей части океана Тетис. Приведенные выше данные о морфологии Грозненского сейсмогена и всей Восточно-Кавказской зоны глубинных землетрясений не позволяют принять такую точку зрения. Представле-

ние о субдукции подразумевает погружение слэба – части литосферной пластины, т.е. двухмерного объекта. Грозненский же сейсмоген, как это хорошо видно на рис. 2 и рис. 3, представляет собой образование одномерное, “сосискообразное”. Поэтому о субдукции в данном случае не может быть и речи. Какие-либо другие материалы, которые могли бы быть истолкованы как указание на существование субдуцирующего слэба, отсутствуют. Секундное положение глубокофокусной сейсмогенной зоны по отношению к Большому Кавказу не позволяет предполагать наличие генетической связи между ними.

Судя по морфологии Грозненского сейсмогена можно, по аналогии со сходными образованиями [Аптикаева и др., 1994; Горбатиков и др., 2015; Ершов, Никишин, 2004], предполагать, что он представляет собой некий канал проницаемости, по которому происходило восходящее перемещение термального мантийного материала — флюидного и/или подплавленного силикатного. В связи с этим следует заметить, что в окрестности г. Грозный отмечено проявление четвертичного вулканизма [Милановский, Короновский, 1973]. Проникновение глубинного материала в верхи мантии и, возможно, в земную кору сопровождается, по-видимому, возникновением очагов землетрясений.

Канал на глубине более 80–85 км представляет собой наклонный (50–60°) “сосискообразный” объем мантии с округлым или овальным поперечным сечением, диаметры которого измеряются в разных его частях величинами в 20–40–60 км. На глубинах ~50–85 км канал проницаемости выполаживается и резко расширяется в горизонтальных направлениях. Поступающий по наклонному каналу глубинный материал, по-видимому, начинает растекаться в этих направлениях. Возникает Основное поле глубинных землетрясений Грозненского сейсмогена. В этом же интервале глубин располагается Серповидное поле глубинных очагов. На этом уровне глубин связь между Основным и Серповидным полями очагов не наблюдается. Но, может быть, она осуществляется на более высоком, нижнекоровом уровне. На такую возможность указывает то, что эти поля в плане ложатся в единую полосу с характерным СЗ–ЮВ простиранием.

“Тела” или “объемы” сходных с Грозненским сейсмогеном “наклонных столбов” неправильной формы известны в Альборанском [Blanco et al., 1993] (рис. 8) и Тирренском [Kulakov et al., 2009] (рис. 9) сегментах Альпийско-Индонезийского подвижного пояса (см. также [Шевченко и др., 2017]).

В этих двух случаях столбообразные “тела” прослежены до глубин 500–700 км в первом и 300–400 км во втором случаях, после чего они выполаживаются. В результате на продольных профилях эти или аналогичные “тела” могут быть приняты за слэбы, т.е. за субдуцирующие части литосферных плит (см., например, [Кропоткин, Ларионов, 1976]). Но на поперечных профилях ясно видно, что в таких сечениях они имеют неправильно-округлую, ~изометричную форму. Все это позволяет говорить о “сосискообразности” как рассматриваемых тел, так и Грозненского сейсмогена. И.Ю. Кулаков использовал эту характеристику применительно к тирренскому “телу” (устное сообщение, ИФЗ РАН).

Помимо наклонных, изгибающихся, “сосискообразных”, известны субвертикальные, практически прямолинейные “тела” (“сейсмические

гвозди” по [Вадковский, 1996; 2012]). Они также выявлены разными методами в Таджикской депрессии [Аптикаева и др., 1994; Шевченко и др., 2011], на Большом Кавказе [Горбатиков и др., 2015], в Карпатах [Шевченко и др., 2011], на Памире и в Центральном Тянь-Шане [Баталев и др., 2017; Sass et al., 2014].

Альборанское “тело” (рис. 8), как и Грозненский сейсмоген, четко демонстрирует отсутствие связи с тектонической структурой Альпийско-Индонезийского подвижного пояса. Оно ориентировано диагонально по отношению к простиранию элементов этой структуры. Отсутствие связи с тектонической структурой региона демонстрирует также субвертикальное, круто наклоненное столбообразное “тело” на территории Гармского геодинамического полигона в Таджикистане и сходное морфологически образование (зона Вранча) в Карпатах [Шевченко и др., 2011].

Вместе с тем имеются материалы, которые свидетельствуют о том, что некоторые из перечисленных близвертикальных столбообразных “тел”, морфологически сходных с другими, отличаются от них четкой связью с тектонической структурой. Мы имеем в виду столбообразные “тела” [Аптикаева и др., 1994; Горбатиков и др., 2015], определенно приуроченные к осевым частям прогибов в составе подвижных поясов и сооружений. Названные исследователи рассматривают эти “тела” как некие зоны проницаемости, зоны миграции флюидов или расплавов. Есть основания полагать, что мигрирующие по таким близвертикальным зонам проницаемости флюиды и/или расплавы могут играть важную роль в процессах формирования тектонической структуры подвижных поясов и сооружений земной коры за счет привноса в земную кору дополнительных объемов глубинного минерального материала [Шевченко и др., 2017].

Таким образом, приведенные данные по Грозненскому сейсмогену и некоторые упомянутые литературные материалы по другим “сосископодобным” и “столбообразным” образованиям свидетельствуют о том, что они, во-первых, достаточно широко распространены в литосфере и играют существенную роль в тех процессах сейсмогенеза, которые не имеют очевидной связи с тектонической структурой. Во-вторых, они напоминают о существовании морфологически сходных каналов проницаемости, которые с тектонической структурой тесно связаны пространственно и, тем самым, по-видимому, генетически.

Если еще раз посмотреть на Кавказский перешеек в свете приведенного материала по сейсмичности (рис. 1) и принятой нами ее интерпретации, то можно предположить, что рассеянные эпицентры землетрясений указывают на существование более-менее повсеместно присутствующего рассеянного восходящего потока флюидно-

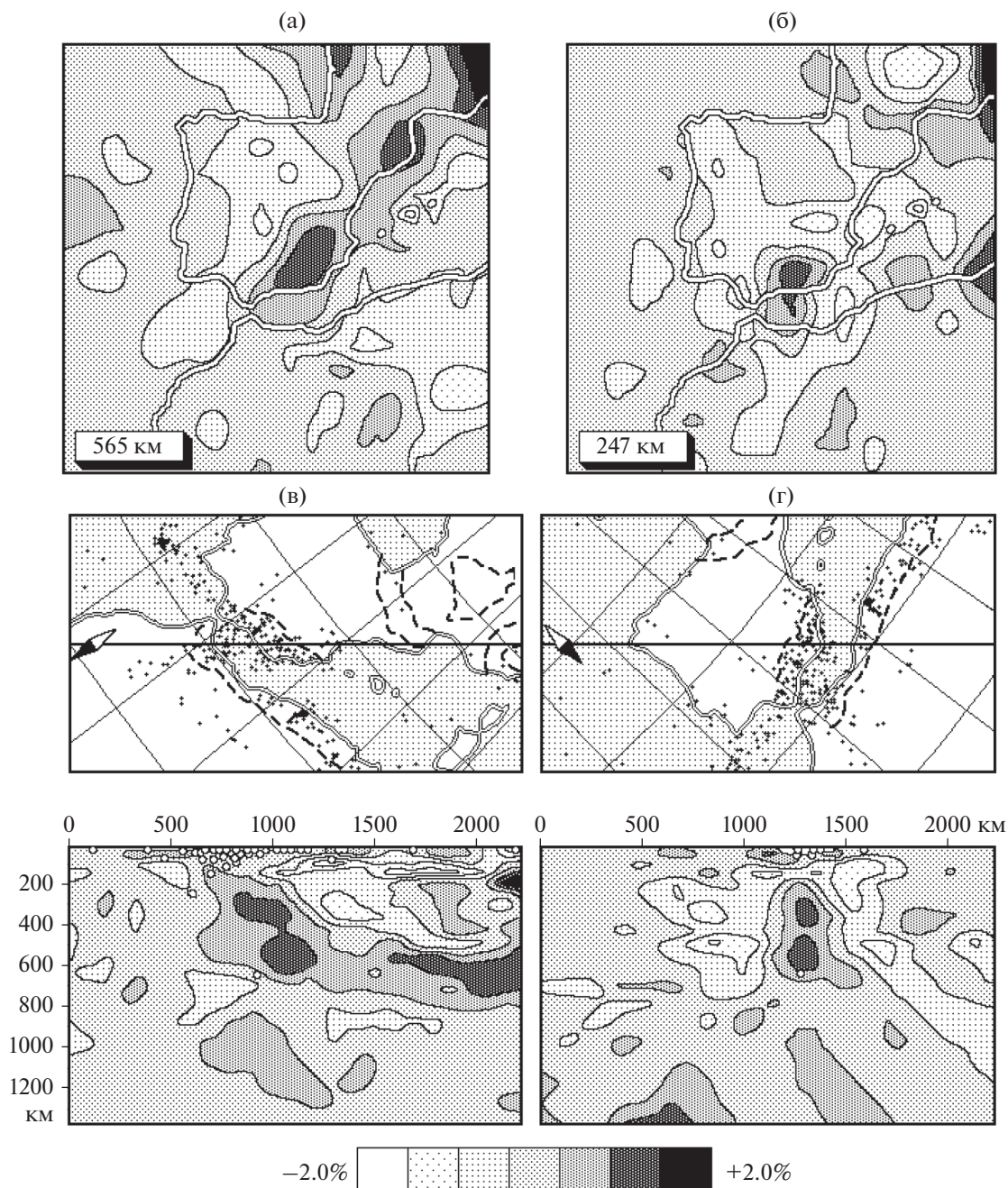


Рис. 8. (а), (б) – горизонтальные срезы сейсмотомографической высокоскоростной аномалии в альборанском сегменте Альпийско-Индонезийского подвижного пояса; цифрами обозначены глубины срезов; (в), (г) – сейсмотомографические профили по простиранию (в) и вкрест (г) высокоскоростной аномалии. Местоположение профилей показано горизонтальными линиями на картах на средних секциях рисунка. Крестиками на картах и кружками на профилях показаны очаги землетрясений (по [Blanco et al., 1993], фрагмент).

го материала, инициирующего общую обстановку напряженного состояния субгоризонтального сжатия (объемного распора). В ряде участков интенсивность потока, по-видимому, возрастает, что приводит к возникновению небольших плотных скоплений эпицентров землетрясений. И в том, и в другом случае процессы сейсмогенеза локализованы в земной коре, что не исключает поступ-

ление флюидного материала из самых верхов мантии. В отличие от этого возникновение и функционирование Грозненского сейсмогена (и, по-видимому, всей Восточно-Кавказской сейсмогенной полосы) совершенно однозначно связаны с процессом, четко локализованным в мантии. К сожалению, природу напряженного состо-

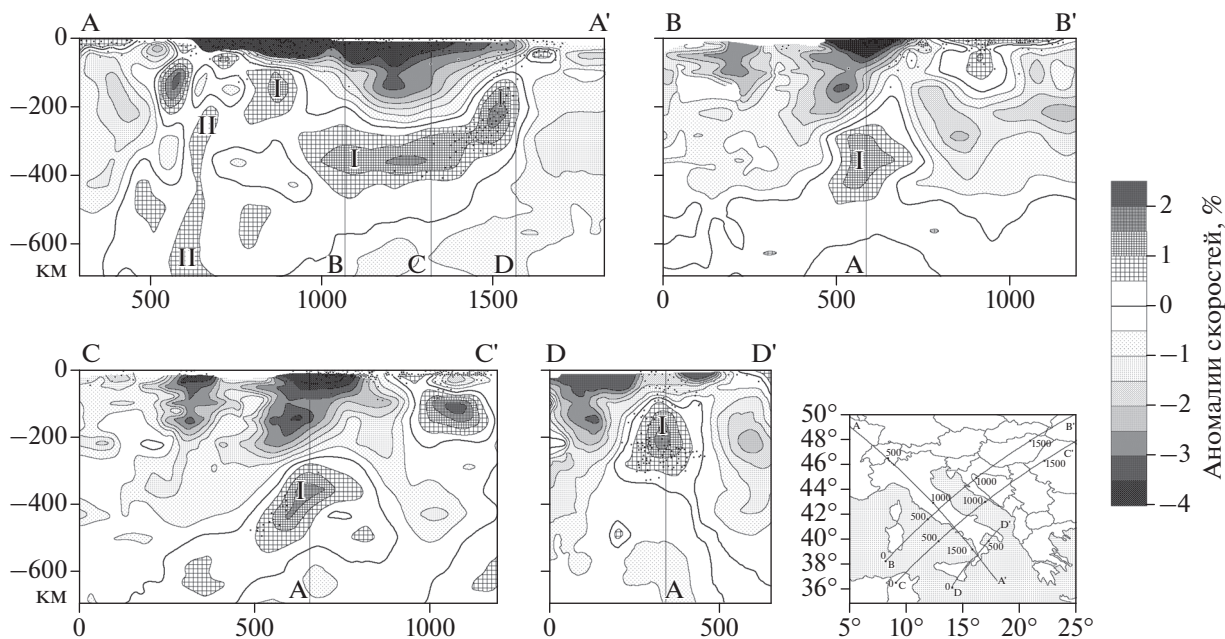


Рис 9. Продольный (А–А¹) и поперечный (В–В¹, С–С¹ и D–D¹) профили через сейсмотомографическую высокоскоростную аномалию на территории северо-восточного обрамления Тирренской впадины (по [Kulakov et al., 2009] и Кулакову И.Ю., устное сообщение в ИФЗ РАН). Штриховкой и заливкой показано отклонение скорости прохождения сейсмических волн *P* от стандартного распределения. Расположение профилей показано на нижнем правом рисунке.

яния Грозненского сейсмогена интерпретировать не удалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате настоящего исследования установлено существование “сосискообразного” сейсмогенного мантийного “тела” в пределах восточной части Кавказского перешейка между Черным и Каспийским морями. Оно погружается в направлении с юго-востока на северо-запад до глубины 160 км и существенно расширяется в интервале глубин 50–75 км в направлении на юго-восток. Вид сейсмотектонической деформации этого глубинного мантийного тела, устанавливаемый по совокупностям фокальных механизмов землетрясений, определяется преобладанием субгоризонтального удлинения в близмеридиональном направлении. Он принципиально отличается от такового для верхнего этажа земной коры, где материал горных пород, согласно совокупностям фокальных механизмов коровых землетрясений, деформируется в условиях преобладания субгоризонтального сжатия вкrest простирания тектонических структур Большого Кавказа. Конфигурация сейсмогенного мантийного тела и вид его напряженного состояния не позволяют принять существующую его интерпретацию (в рамках плейттектонической концепции) как результат погружения субдуцирующей Аравийской литосферной плиты под Евразийскую плиту вкrest простирания кавказских структур.

В литературе для аналогичных тел (мантийных и коровых) существует иная трактовка: они рассматриваются как некие каналы повышенной проницаемости для подтока глубинных флюидов и/или подплавленного силикатного материала в земную кору. Тем самым предполагается возможность проявления эндогенных процессов, развивающихся самостоятельно в земной коре и в верхней мантии и играющих, в нашем случае, заметную роль в сейсмичности региона.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою благодарность И.П. Габсатаровой за предоставленные ею публикации, в которых она приводит списки фокальных механизмов очагов для ряда землетрясений Кавказа, использовавшихся в данной статье, а также А.А. Годзикинской за инициацию интереса к изучению глубокофокусных землетрясений Кавказа. Авторы также благодарны А.В. Дещеревскому за помощь в создании электронной базы данных о землетрясениях Кавказа за период 2000–2016 гг. и за расчеты вертикальных разрезов сейсмичности через область глубоких землетрясений Кавказа.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Статья подготовлена в рамках госзадания ИФЗ РАН для лаборатории 303 на 2017–2019 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антикаева О.И., Копничев Ю.Ф., Шевченко В.И.* Строение коры и верхней мантии и тектогенез территории Гармского полигона (Таджикистан) // *Физика Земли*. 1994. № 7–8. С. 53–64.
- Барковская К.С., Безбородов Р.С., Брод И.О. и др.* Геологическое строение восточной части северного склона Кавказа. Тр. Комплексной южной геологической экспедиции. 1960. Вып. 2. М.: Гостоптехиздат. 320 с.
- Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Рыбин А.К., Матюков В.Е.* Взаимосвязь тектонических и морфологических характеристик с глубинным строением Центрального Тянь-Шаня. Тектоника современных и древних океанов и их окраин. М-лы XLIX (49) Тектонического совещания. 2017. Т. 1. М.: ГЕОС. С. 48–52.
- Бурмин В.Ю., Шемелева И.Б., Флейфель Л.Д., Аветисян А.М., Казарян К.С.* // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 45. № 1. С. 39–48.
- Вадковский В.Н.* Природа и механизм сейсмических “гвоздей”. Тез. докл. “Ломоносовские чтения”. 1996. М. С. 63–64.
- Вадковский В.Н.* Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений – сейсмические “гвозди” // *Вестник ОНЗ РАН*. 2012. Т. 4. NZ1001. <https://doi.org/10/2205/2012NZ000110>
- Габсатарова И.П.* Глубокие землетрясения в Терско-Сунженской зоне. Материалы пятой международной сейсмологической школы: “Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных”. Владикавказ 4–8 октября 2010 г. Изд-во: Обнинск – ГС РАН. 2010. С. 59–64.
- Габсатарова И.П., Королецки Л.Н., Малянова Л.С.* О механизмах очагов землетрясений на различных глубинах в Терско-Сунженской зоне. 11-я Международная сейсмологическая школа: “Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных”. ФИЦ ЕГС РАН (Обнинск). Изд-во: г. Чолпон-Ата, Кыргызстан. 2016. С. 103–107.
- Геология СССР. Северный Кавказ. Геологическое описание. 1968. Т. 9. М.: Недра. 759 с.
- Геология СССР. Азербайджанская ССР. Геологическое описание. 1972. Т. 47. М.: Недра. 520 с.
- Годзиковская А.А.* Мантийные землетрясения Кавказа в районе Терско-Сунженского прогиба // *Изв. АН ССР. Сер. Физика Земли*. 1988. № 7. С. 102–106.
- Годзиковская А.А.* Глубокие землетрясения Кавказа. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Мат-лы 3-й Международной школы. Кисловодск, 20–24 октября 2008 г. 2008. Изд-во: Федеральный центр “Единая Геофизическая служба Российской академии наук” (Обнинск). С. 34–40.
- Годзиковская А.А.* Еще раз о глубоких землетрясениях Кавказа // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2017. Т. 44. № 3. С. 41–56. <https://doi.org/10.21455/VIS2017.3-3>
- Годзиковская А.А., Рейснер Г.И.* Эндогенная позиция глубоких землетрясений Кавказа // *Геотектоника*. 1989. № 3. С. 15–25.
- Горбатов А.В., Розожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Андреева Н.В., Передерин Ф.В., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Дзедобов Б.А., Габараев А.Ф.* Особенности глубинного строения и современной тектоники Большого Кавказа в Осетинском секторе по комплексу геофизических данных // *Физика Земли*. 2015. № 1. С. 28–39.
- Гугунава Г.Е.* К проблеме глубинного строения Кавказа // *Сообщ. АН ГрузССР*. 1976. Т. 84. № 1. С. 97–100.
- Гусева Т.В., Лукк А.А., Певнев А.К., Сквородкин Ю.П., Шевченко В.И.* Комплексные геодинамические исследования в области перехода от Памира к Тянь-Шаню. Современная тектоническая активность Земли и сейсмичность. 1987. М.: Наука. С. 81–96.
- Гущин А.И., Панов Д.И.* Структура зоны Бокового хребта на Восточном Кавказе // *Вестник Моск. ун-та. Геология*. 1992. № 2. С. 25–37.
- Гущин А.И., Никитин М.Ю., Панов Д.И., Шевченко В.И.* Строение Восточного Кавказа (Варандинско-Андийское и Сторское пересечения) // *Бюл. МОИП, отд. геол.*, 1996. Вып. 2. С. 53–63.
- Джибладзе Э.А.* О “глубоких” очагах землетрясений Кавказа // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1983. № 3. С. 22–33.
- Еришов А.В., Никишин А.М.* Новейшая геодинамика Кавказско–Аравийско–Восточно-Африканского региона // *Геотектоника*. 2004. № 2. С. 55–72.
- Кропоткин П.Н., Ларионов Л.В.* Глубинные сейсмичные разломы Крымско-Кавказской области и движущие литосферные плиты // *Докл. АН СССР*. 1976. Т. 230. № 2. С. 311–314.
- Лукк А.А., Шевченко В.И.* Характер деформирования земной коры Гармского района (Таджикистан) по геологическим и сейсмологическим данным // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1986. № 7. С. 16–33.
- Лукк А.А., Шевченко В.И.* Структура сейсмического поля и разрывная тектоника Гармского района в Таджикистане // *Физика Земли*. 1990. № 1. С. 5–20.
- Лукк А.А., Юнга С.Л.* Сейсмоструктурная деформация Гармского района // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1979. № 10. С. 24–43.
- Лукк А.А., Юнга С.Л.* Геодинамика и напряженно-деформированное состояние литосферы Средней Азии. 1988. Душанбе: Дониш. 236 с.
- Лукк А.А., Шевченко В.И.* Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа // *Физика Земли*. 2019. № 4. С. 99–123.
- Милановский Е.Е., Хаин В.Е.* Геологическое строение Кавказа. М.: изд-во Моск. ун-та. 1963. 358 с.
- Милановский Е.Е., Короновский Н.В.* Орогенный вулканизм и тектоника Альпийского пояса Евразии. 1973. М.: Недра. 280 с.
- Муратов М.В.* Строение складчатого основания Средиземноморского пояса Европы и Западной Азии и главные этапы развития этого пояса // *Геотектоника*. 1969. № 2. С. 3–21.
- Никитин Л.В., Юнга С.Л.* Методы теоретического определения деформаций и напряжений в сейсмоактивных областях // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1977. № 11. С. 54–67.
- Резанов И.А., Шевченко В.И.* Строение и эволюция земной коры геосинклинали. 1978. М.: Недра. 183 с.
- Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П., Шумилина Л.С.* К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе // *Физика Земли*. 2007. № 7. С. 31–45.
- Хаин В.Е.* Сопоставление фиксистских и мобилистских моделей тектонического развития Большого Кавказа // *Геотектоника*. 1982. № 4. С. 2–13.

- Хаин В.Е. Региональная геотектоника. Альпийский Средиземноморский пояс. 1984. М.: Недра. 344 с.
- Халилов Э.Н., Мехтиев Ш.Ф., Хаин В.Е. О некоторых геофизических данных, подтверждающих коллизионное происхождение Большого Кавказа // Геотектоника. 1987. № 2. С. 54–60.
- Шевченко В.И., Арефьев С.С., Лукк А.А. Близвертикальные скопления очагов землетрясений, не связанные с тектонической структурой земной коры // Физика Земли. 2011. № 4. С. 16–38.
- Шевченко В.И., Лукк А.А., Гусева Т.В. Автономная и плиттектоническая геодинамика некоторых подвижных поясов и сооружений. 2017. М.: ГЕОС. 612 с.
- Юнга С.Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1979. № 10. С. 14–23.
- Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. 1990. М.: Наука. 191 с.
- Blanco M.J., Spakman W. The P-wave velocity structure of the mantle below the Iberian Peninsula: evidence for subducted lithosphere below southern Spain // Tectonophysics. 1993. V. 221. № 1. P. 13–34.
- International Seismological Centre (ISC), On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>
- Koulakov I., Kaban M.R., Tesauro M., Cloeting S. P- and S-velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data // Geoph. J. Int. 2009. V. 179. № 1. P. 345–366.
- Sass P., Ritter O., Ratschbacher L., Tjallingii J., Matukov V.E., Rybin A.K., Batalev V.Yu. Resistivity structure underneath the Pamir and Southern Tian Shan // Geoph. Journ. Int. 2014. V. 198. P. 564–579.
- Tan O., Taymaz T. Active tectonics of the Caucasus: Earthquake source mechanisms and rupture histories obtained from inversion of teleseismic body waveforms Dilek Y., Pavlides S., (eds.), Postcollisional tectonics and magmatism in the Mediterranean region and Asia: Geological Society of America Special Paper 409. 2006. P. 531–578. [https://doi.org/10.1130/2006.2409\(25\)](https://doi.org/10.1130/2006.2409(25))

Deep Mantle Earthquakes in the Eastern Part of the Caucasian Isthmus

V. I. Shevchenko^{a, *} and A. A. Lukk^a

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

**e-mail: shevch@ifz.ru*

Received November 29, 2018; revised February 28, 2019; accepted March 25, 2019

Based on the data on the distribution of mantle seismicity and the sets of the focal mechanisms of the earthquakes, the existence and type of deformation of an allantoid mantle body within the eastern part of the Caucasus Isthmus is established. The body is inclined and plunges from the southeast to the northwest to a depth of 160 km. The shape of the mantle body and the type of its stress state, which is fundamentally different from that for the Earth's crust of the region, precludes us from accepting the plate tectonic interpretation of this formation (in the form of a concept implying the submersion of the subducting part of the Arabian lithospheric plate beneath the Eurasian plate). It is hypothesized that this phenomenon is associated with the process of tectogenesis developing in the subcrustal mantle of the Caucasus irrespective of the collision processes.

Keywords: mantle seismicity, mantle body, focal mechanisms, stress state, subducting slab