

УДК 551.242

СЕЙСМИЧНОСТЬ, ТЕКТОНИКА И GPS-ГЕОДИНАМИКА КАВКАЗА

© 2019 г. А. А. Лукк^{1*}, В. И. Шевченко^{1**}

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

*E-mail: lukk@ifz.ru

**E-mail: shevch@ifz.ru

Поступила в редакцию 06.08.2018 г.

Принята в печать 03.12.2018 г.

Тип сейсмотектонического деформирования земной коры Кавказа и его ближайшего окружения соответствует обстановке надвигообразования при субгоризонтальной ориентации главной оси сжатия (в северо-северо-восточном направлении, вкрест простирания кавказских структур) и субвертикальной ориентации главной оси растяжения, устанавливаемых на основе реконструкции по представительной совокупности механизмов очагов землетрясений. Он в целом вполне согласуется с развиваемыми в плейттектонической концепции представлениями о сильном поперечном сужении кавказского сегмента Альпийско-Индонезийского подвижного пояса в результате сближения Аравийской и Евразийской литосферных плит.

В то же время, в результате детальных геодезических измерений, выполненных на территории Большого Кавказа, наблюдаются смещения GPS-пунктов, свидетельствующие об увеличении его ширины. Это увеличение не может быть связано с растяжением вкрест простирания этого сооружения, поскольку решения механизмов очагов землетрясений на его территории однозначно указывают на то, что здесь имеет место обстановка напряжений сжатия вкрест простирания геологических структур. Подобное сочетание геодезических и сейсмологических данных предлагается объяснять активным увеличением объема (и, в том числе, площади) слоистых горных пород Большого Кавказа и возникновением обстановки распора пород в результате, по видимому, поступления в них дополнительного минерального материала, привносимого восходящими потоками глубинных флюидов.

Ключевые слова: Кавказ, сейсмичность, механизмы очагов, GPS-измерения, геологические дислокации, объем горных пород

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019499-123>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в науках о Земле господствующее положение занимает плейттектоническая концепция. Согласно этой концепции верхние оболочки Земли разделяются на плиты, блоки, глыбы земной коры/литосферы разных размеров, смещающиеся по горизонтали относительно друг друга. Существование таких плит, блоков, глыб было предположено и обосновано в результате анализа геофизических (в первую очередь, сейсмических и магнитометрических) материалов по акваториям океанов [Зоненшайн и др., 1976; Нова..., 1974; Хаин, 2001; Хаин, Ломизе, 1995; 2010; и мн. др.]. Затем соответствующие представления были распространены на территории континентов, на располагающиеся в их пределах подвижные пояса. Реальность существования плит, блоков, глыб земной коры/литосферы и их латеральных

перемещений была убедительно подтверждена геодезическими GPS-измерениями в глобальной, общеземной системе координат ITRF [Heflin et al., 2004].

Распространено представление, что формирование покровно-складчато-надвиговой тектонической структуры подвижных поясов и ряда других сооружений связано с их раздавливанием, с их сужением в результате сближения литосферных плит или их частей [Кропоткин, 1964; Трифионов и др., 2015; Хаин, 1984; 2001; Хаин, Ломизе, 2010]. Подобную точку зрения разделяет и большинство исследователей геодинамики Кавказа.

Схема взаимодействия таких блоков, глыб на Кавказе в зоне столкновения Аравийской и Евразийской литосферных плит, согласно современным плейттектоническим представлениям, приведена на рис. 1.

Вместе с тем, в результате выполненных геологических, сейсмологических и геодезических исследований Таджикской депрессии и смежных частей Памира и Тянь-Шаня, Большого Кавказа, Провинции Бассейнов и Хребтов (США), а также (по литературным материалам) средиземноморской-малокавказской и индонезийской частей Альпийско-Индонезийского подвижного пояса и Урала [Гусева и др., 1993; Лукк и др., 1986; 1990; 2004; 2008; Шевченко, 1984; 2005; Шевченко и др., 1996; 1999; 2000; 2002; 2006; 2011; 2014; 2016; 2017; 2018] было установлено, что хотя эти элементы тектонической структуры Земли сформировались и ныне находятся в условиях преобладания напряжений субгоризонтального сжатия, ориентированного вкrest их простирания, их ширина, в то же время, не сокращается, а увеличивается.

Совместный анализ результатов геологического картирования, сейсмологических наблюдений и геодезических измерений позволил прийти к выводу, что разрешить это противоречие можно,

если предположить, что образование этих тектонических структур связано не с их сужением в результате приложенного к ним внешнего сжатия, а с активным увеличением объема (и, в том числе, площади) слагающих их толщ слоистых горных пород. Это увеличение предположительно вызвано поступлением в эти породы дополнительного минерального материала в ходе привноса последнего восходящими флюидными потоками из низов коры и/или мантии [Шевченко, 1984; 1999; Шевченко и др., 2017]. Не уместаясь в результате этого на ранее занимаемой территории, слоистые породы сминаются в складки, рассекаются надвигами и взбросами, выплескиваются из прогибов в виде надвигов и покровов на смежные поднятия. Из этого следует, что необходимо, в дополнение к общепринятому взаимодействию литосферных плит как источнику тектогенеза, предположить существование самостоятельного, автономного процесса тектогенеза для объяснения строения и геодинамики упомянутых подвижных поясов и сооружений.

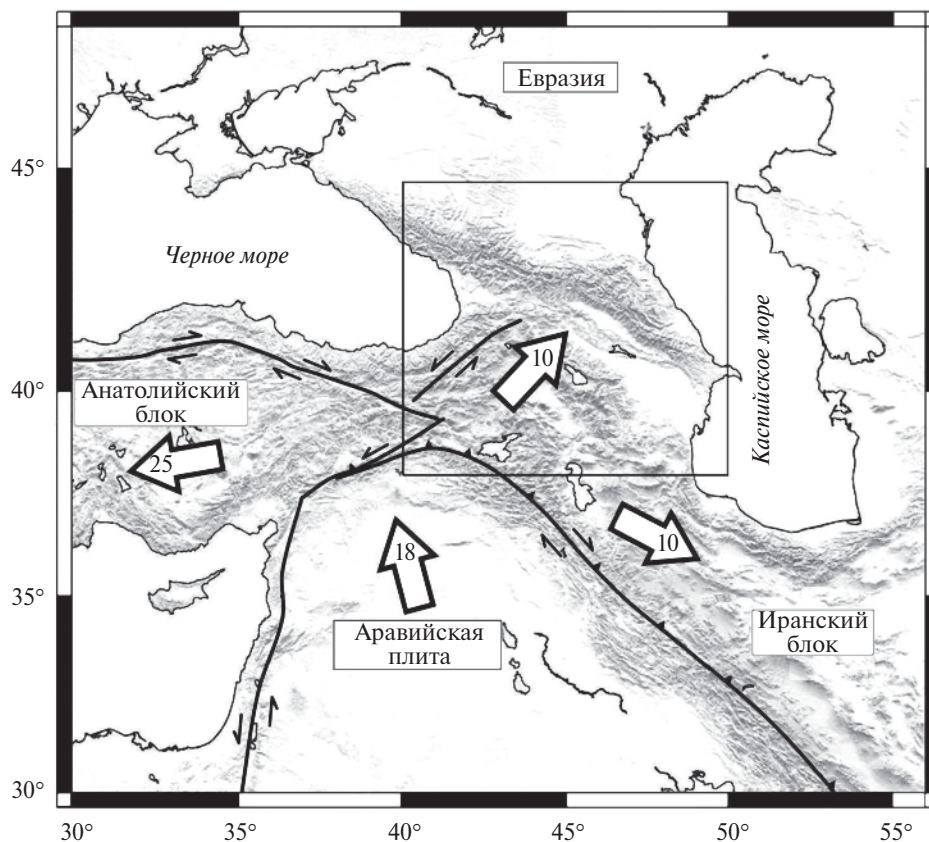


Рис. 1. Относительные движения литосферных плит и блоков земной коры/литосферы в кавказском сегменте Альпийско-Индонезийского подвижного пояса модифицированный рис. 1А из работы [Tan, Taymaz, 2006]. Большие стрелки показывают направление и скорость движения плит и блоков (мм/год внутри больших стрелок) в соответствии с данными GPS-измерений [McClusky et al., 2000] (Евразийская система координат ITRF2000). Прямоугольник в центральной части рисунка – рассматриваемая территория.

Подобные представления мы попытаемся проверить на доступном материале и для Большого Кавказа. Согласно плейттектоническим представлениям, в кавказском сегменте Альпийско-Индонезийского подвижного пояса происходит столкновение Аравийской и Евразийской литосферных плит (рис. 1). Предполагается, что это столкновение определяет активные современные тектонические процессы, горообразование, сейсмичность, кайнозойский вулканизм.

Орографически и геологически Кавказ разделяется на Большой Кавказ и Малый Кавказ. И для того, и для другого характерны чешуйчато-надвиговые тектонические дислокации. Большой Кавказ представляет собой горное сооружение общей протяженностью более 1300 км, с устойчивым общим простиранием в направлении ЗСЗ-ВЮВ. Это сооружение не входит, по нашему мнению, в состав Альпийско-Индонезийского подвижного пояса [Шевченко и др., 2017]. Малый Кавказ, входящий в состав названного пояса, образует выпуклую к северу дугу, в общем огибающую с севера выступ Аравийской литосферной плиты, перемещающейся в северном направлении (рис. 1). Согласно многочисленным геологическим данным, и на Большом, и на Малом Кавказе ведущую роль в тектонической структуре играют чешуйчатые надвиги. Природа этих надвигов большинством исследователей понимается как проявление горизонтального сжатия в земной коре, обусловленного сближением литосферных плит. Мы же рассматриваем эти надвиги с существенно иных позиций.

СЕЙСМИЧНОСТЬ КАВКАЗА

Обратимся к рассмотрению сейсмичности Кавказа. Для ее описания воспользуемся сведениями о землетрясениях с магнитудой $m_b \geq 3$, содержащимися в каталоге Международного сейсмологического центра (ISC), за время 2000–2016 гг. в пределах пространственной выборки с координатами $38\text{--}45^\circ$ с. ш. и $40\text{--}50^\circ$ в. д. (см. рис. 1). Укороченный период рассмотрения выбран из тех соображений, что к началу XXI в. сеть сейсмических наблюдений на рассматриваемой территории достигла достаточной плотности для сравнительно надежной локации происходящих здесь землетрясений.

Представления о сейсмической сети, регистрировавшей сейсмические события в указанный период времени, можно получить из рис. 2, где представлено положение всех сейсмических станций в пределах указанной

пространственной выборки, согласно базе данных в бюллетене ISC. Здесь приведены сейсмические станции, расположенные на территории Азербайджана, Армении, Грузии, Дагестана, Северной Осетии, Краснодарского края, Ставрополя и частично Турции – всего около 230 пунктов.

Как видим, плотность сейсмической сети в указанный период времени была достаточно высокой, что обеспечило практически полное окружение пунктами регистрации лоцируемых сейсмических событий на большей части территории Кавказа. Это позволило определять координаты эпицентров с точностью не хуже 10 км. С оценкой глубин ситуация сложнее. Как известно, для надежного определения глубины землетрясения необходимо наличие, по крайней мере, одной станции на расстоянии от эпицентра не более 2-х глубин очага землетрясения. Мы, согласно схеме расположения станций на рис. 2, рассчитали распределение средних расстояний от каждой станции до ближайших к ней 2–3-х соседних. Соответствующая гистограмма приведена на рис. 3. Согласно этого распределения 40% станций находятся друг от друга на расстояниях 40 км и менее, что позволяет определять сравнительно надежно глубины в земной коре лишь более 10 км, так как хотя бы одна станция, ближайшая к эпицентру лоцируемого землетрясения, располагается на расстоянии менее или равном 20 км и, соответственно, выполняется правило двух глубин очагов, необходимых для надежной оценки лоцируемой глубины. В то же время в пределах отдельных компактных групп станций это расстояние сокращается примерно вдвое и точность определения глубин существенно повышается. Еще около 40% станций располагаются относительно друг друга на расстояниях около 100 км, что позволяет лишь разделять по глубинам коровые и подкоровые сейсмические события. Наличие последних на территории Терско-Сунженской зоны Кавказа отмечалось в ряде исследований [Годзиковская, 1988; 2008; 2017; Габсатарова, 2010; Габсатарова и др., 2016].

В смежной акватории Каспийского моря нарушаются условия полного окружения эпицентров землетрясений сейсмическими станциями и наличия хотя бы одной из регистрирующих станций на расстояниях 50 км и менее от них. Здесь становится затруднительным разделение глубин в интервале от 0 до 80 км, т. е. коровых и «мантийных» землетрясений.

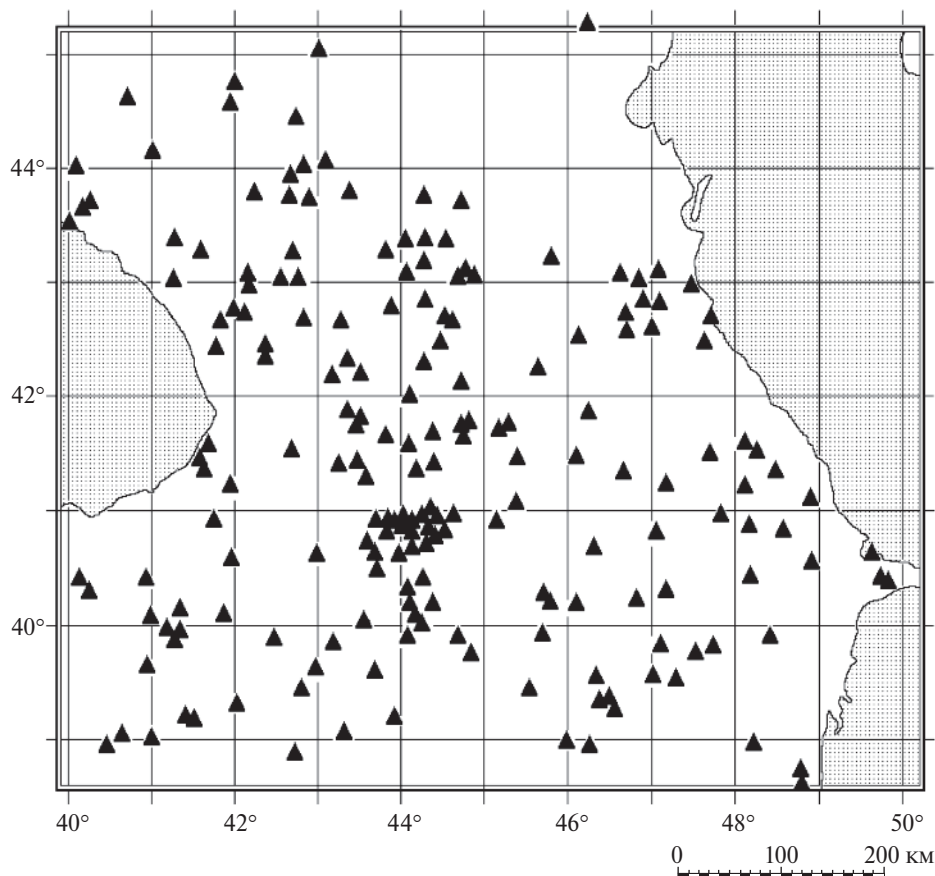


Рис. 2. Сейсмическая сеть на территории Кавказа в 2000–2016 гг. (в равноугольной цилиндрической картографической проекции Меркатора) согласно базе данных ISC.

Отметим, что полностью представительными по магнитуде в используемом нами каталоге землетрясений Кавказа являются сейсмические события с $m_b \geq 3.8$, что проверялось путем построения графика повторяемости для используемой нами выборки.

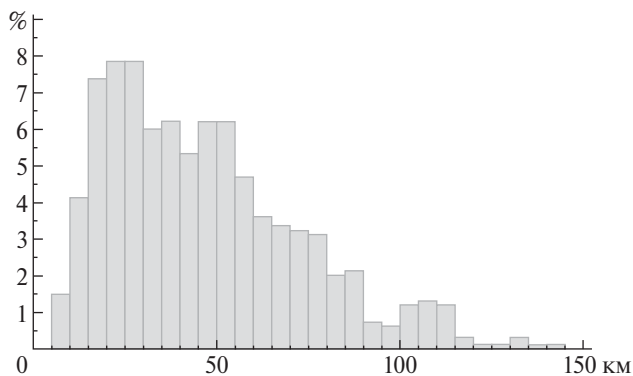


Рис. 3. Расчетная гистограмма средних расстояний от каждой станции до ближайших к ней 2–3-х соседних согласно схеме расположения станций на рис. 2.

На территории Большого Кавказа произошло лишь 3 достаточно сильных землетрясения с $m_b = 5.6–5.7$ за рассматриваемый период времени (в 2008–2012 гг.). Более сильные сейсмические события с магнитудами 5.9–6.1 (2 события) и 6.8 (1 событие) произошли на территории Малого Кавказа в 2011–2012 гг., это при том, что уровень слабой сейсмичности здесь был ниже, чем на территории Большого Кавказа.

На рис. 4 приведена карта эпицентров землетрясений Кавказа с магнитудой 3 и более, локализуемых описанной выше системой наблюдений. Примерно половина эпицентров землетрясений сосредоточена в центральной части рассматриваемой территории.

Принято связывать расположение эпицентров с близвертикальными разломами, с границами блоков в земной коре. Однако на приведенной карте не видно хорошо выраженных линейных цепочек землетрясений, что было бы естественно при такой их связи. Вместо этого преимущественно имеет место неравномерно

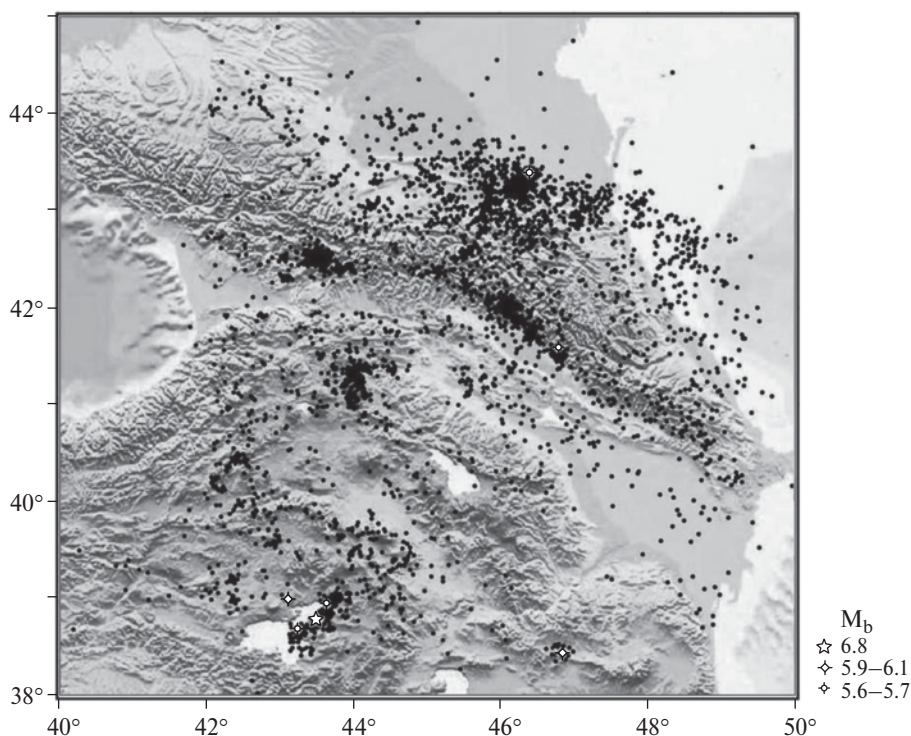


Рис. 4. Карта эпицентров землетрясений Кавказа и смежной территории с магнитудой 3 и более за 2000–2016 гг. по данным Бюллетеня ISC.

рассеянное положение эпицентров. Можно отметить только, что землетрясения более-менее маркируют восточную часть хребта Большого Кавказа. Но обращает на себя внимание ряд пятен относительно изометричных или неправильной формы плотных сгущений эпицентров. Они располагаются непосредственно восточнее поднятия Терского и Сунженского хребтов в Восточном Предкавказье, в восточной части Гагра-Джавской зоны Центрального Кавказа, в центральной части Главного хребта Восточного Кавказа, в пределах Севано-Акеринской ветви Анатолийско-Малокавказского офиолитового пояса и смежной части Сомхето-Карабахского антиклинория Малого Кавказа к СЗ от оз. Севан, т. е. в пределах весьма разнородных элементов тектонической структуры региона. Представляется весьма вероятным, что эти сгущения эпицентров землетрясений приурочены не столько к каким-либо конкретным близ-вертикальным разрывным нарушениям, сколько, скорее, маркируют восходящие потоки глубинных флюидов, которые играют важную роль в процессах текто- и сейсмогенеза [Шевченко и др., 2011; 2017].

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ТЕРРИТОРИИ КАВКАЗА

Большой интерес представляет оценка характера сейсмотектонической деформации рассматриваемой территории. Эта оценка осуществлялась по данным о фокальных механизмах землетрясений. Такие сведения мы извлекли из бюллетеня ISC [www.isc.ac.uk], из бюллетеня NEIC [www.neic.usgs.gov], а также из глобального каталога Global Centroid Moment Tensor (GCMT) [www.globalcmt.org]. Выборка СМТ-решений осуществлялась из прямоугольника с координатами: 40–44° с. ш. и 41–50° в. д. за срок с 1981 по 2016 гг. Параметры СМТ-решений для этих событий приведены в таблице. Жирные номера соответствуют событиям, ориентация азимутов простирания главных осей P которых показана ниже на рис. 7. Жирные даты соответствуют определениям фокальных механизмов, заимствованным из работы [Габсатарова и др., 2016].

Графические решения приведенных в таблице фокальных механизмов (СМТ-решения) показаны на рис. 5а, 5б. Подавляющее большинство этих фокальных механизмов показывают преобладание субгоризонтального сжатия.

Фокальные механизмы (СМТ-решения) коровых землетрясений Кавказа

№/№	Дата	Координаты эпицентра		Гл. h , км	Mag m_b	Ориентация главных осей фокальных механизмов					
		с. ш.	в. д.			P		T		B	
						Azm	α	Azm	A	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	1981-02-23	41°50	46°05	33	5.1	205	20	326	54	104	28
3	1981-10-18	43°19	45°19	33	4.9	009	15	134	65	273	19
4	1984-09-18	40°54	42°14	10	5.3	341	31	242	15	130	55
5	1984-10-18	40°47	42°29	19	5.3	013	07	121	70	280	19
6	1985-07-04	42°09	45°48	33	5.2	165	40	013	47	267	14
7	1986-05-13	41°26	43°43	08	5.7	193	08	102	06	335	79
8	1988-05-03	42°29	47°41	29	5.1	037	29	218	61	127	00
9	1988-12-07	41°06	44°22	15	6.7	167	19	293	60	068	22
10	1989-08-03	43°34	45°22	25	5.0	194	03	075	83	285	06
11	1990-12-16	41°22	43°43	28	5.2	195	08	104	06	337	80
12	1991-04-29	42°25	43°40	17	6.2	186	07	311	77	095	10
13	1991-04-29	42°31	43°53	10	6.2	161	04	276	80	070	09
14	1991-05-03	42°40	43°15	01	5.3	200	04	299	64	108	26
15	1991-06-15	42°26	44°01	09	6.1	079	05	341	56	173	33
16	1991-07-04	42°23	44°08	12	5.0	082	10	318	72	175	15
17	1991-10-06	41°09	43°27	02	5.0	349	16	256	12	131	70
18	1992-10-23	42°40	45°01	15	6.4	166	37	325	51	068	10
19	1995-01-29	40°02	40°10	33	4.8	168	13	074	14	299	70
20	1997-11-27	42°52	45°22	30	5.3	351	10	105	68	257	20
21	1999-01-31 а	41°12	48°01	13	5.3	186	64	345	24	079	08
22	1999-01-31 б	43°15	46°55	35	5.8	038	14	262	71	132	13
23	1999-02-21	43°16	46°55	33	5.1	034	15	262	68	129	15
24	1999-06-04	40°46	47°28	33	5.4	118	07	003	75	210	14
25	1999-12-03	40°25	42°22	13	5.7	177	09	083	20	290	68
26	2000-03-20	40°26	42°24	06	4.4	196	08	103	17	309	71
27	2000-09-24	42°28	47°22	33	4.6	059	01	152	63	329	27
28	2000-09-27	41°05	49°35	29	4.6	101	43	192	01	283	47
29	2000-11-25	40°14	49°57	15	5.8	240	46	056	44	148	02
30	2000-11-25	40°25	50°16	26	6.5	217	68	031	22	122	02
31	2001-01-07	40°06	50°01	48	5.2	181	49	322	34	066	20
32	2001-05-22	46°22	42°10	33	4.5	184	19	310	59	085	23
33	2001-05-29	39°44	41°57	10	4.8	337	04	073	55	244	34
34	2001-07-10	39°49	41°38	22	4.9	335	02	073	76	245	14
35	2001-08-20	40°10	42°04	25	4.3	333	20	239	13	118	66
36	2001-11-08	41°38	46°36	14	3.9	021	24	198	66	291	01
37	2002-04-25	41°46	44°49	10	4.7	228	32	134	05	036	57
38	2002-08-18	40°48	42°28	02	4.6	008	15	131	64	273	21

Таблица (окончание)

№/№	Дата	Координаты эпицентра		Гл. h , км	Mag m_b	Ориентация главных осей фокальных механизмов					
		с. ш.	в. д.			P		T		B	
						Azm	α	Azm	A	Azm	α
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
39	2002-10-22	39°26	40°11	15	4.8	182	17	276	13	041	69
40	2002-11-24	43°13	47°05	10	4.2	016	20	171	69	283	08
41	2003-06-01	41°04	47°23	29	4.7	175	13	268	16	048	69
42	2004-03-25	40°03	40°42	16	5.0	144	12	234	02	335	77
43	2004-03-28	40°04	40°44	19	5.3	134	07	043	09	259	78
44	2004-07-01	39°47	43°58	05	5.3	171	12	273	46	070	42
45	2004-07-30	43°46	43°58	10	4.7	346	11	256	00	166	79
46	2005-01-07	43°30	44°58	25	4.4	004	01	261	86	094	04
47	2005-03-13	40°19	45°52	10	4.5	240	59	344	08	078	29
48	2005-10-06	40°26	53°08	08	4.8	244	54	135	14	035	33
49	2006-02-06	42°39	43°30	23	5.2	214	16	351	68	119	14
50	2008-10-11 а	43°25	46°20	12	5.6	002	05	112	82	275	07
51	2008-10-11 б	43°23	46°14	15	5.2	005	02	112	82	275	07
52	2009-02-01	40°27	42°19	13	4.4	193	03	284	170	092	72
53	2009-09-07	42°35	43°27	15	6.0	212	17	007	71	120	08
54	2010-06-07	42°40	41°37	07	4.2	204	11	053	78	295	06
55	2010-06-07	42°41	41°37	07	4.2	196	08	057	80	287	07
56	2010-06-09	43°32	45°31	19	4.4	185	29	064	43	297	33
57	2011-01-19	41°58	42°40	10	5.3	359	11	250	59	095	29
58	2011-08-18	42°32	42°59	10	5.0	196	08	057	80	287	07
59	2011-09-27	41°17	44°00	07	4.2	020	03	111	24	283	66
60	2012-01-21	39°55	41°42	12	3.4	140	36	315	54	049	24
61	2012-05-07 а	41°33	46°47	11	5.6	200	37	016	53	108	02
62	2012-05-07 б	41°33	46°43	12	5.4	280	82	026	02	116	08
63	2012-10-14	41°49	46°24	10	5.5	194	37	005	52	101	04
64	2012-12-23	42°25	41°05	15	5.7	079	08	171	11	313	76
65	2012-12-25	42°26	40°58	10	5.3	257	01	167	06	353	84
66	2013-03-26	43°13	41°38	10	5.1	208	14	063	73	300	09
67	2013-05-28	43°13	41°37	10	5.1	186	10	307	71	093	16
68	2013-09-17	42°09	45°49	05	5.3	186	36	345	53	089	10
69	2014-04-14	43°35	44°09	4	4.2	017	36	232	48	121	18
70	2014-04-27	43°01	45°53	13	4.7	035	31	163	46	286	28
71	2014-06-02	43°33	45°29	10	4.8	348	77	173	13	082	01
72	2014-09-29	41°25	47°46	33	5.5	186	64	345	24	079	08
73	2014-11-24	43°06	45°51	10	4.6	354	12	124	71	261	14
74	2015-09-04	40°59	47°34	14	5.5	198	17	290	06	038	72
75	2016-07-12	41°16	44°03	10	4.8	011	01	281	09	107	81
76	2016-08-01	40°05	48°05	10	5.5	066	05	309	78	157	10

Примечание: решения даны для нижней полусферы; углы α – наклона главных осей тензора СМТ – отсчитываются от горизонта. Гипоцентральные данные и магнитуды даны по ISC бюллетеню до 2011 г. включительно и по бюллетеню NEIC [www.neic.usgs.gov] или по каталогу GCMT [www.globalcmt.org] после 2011 г.

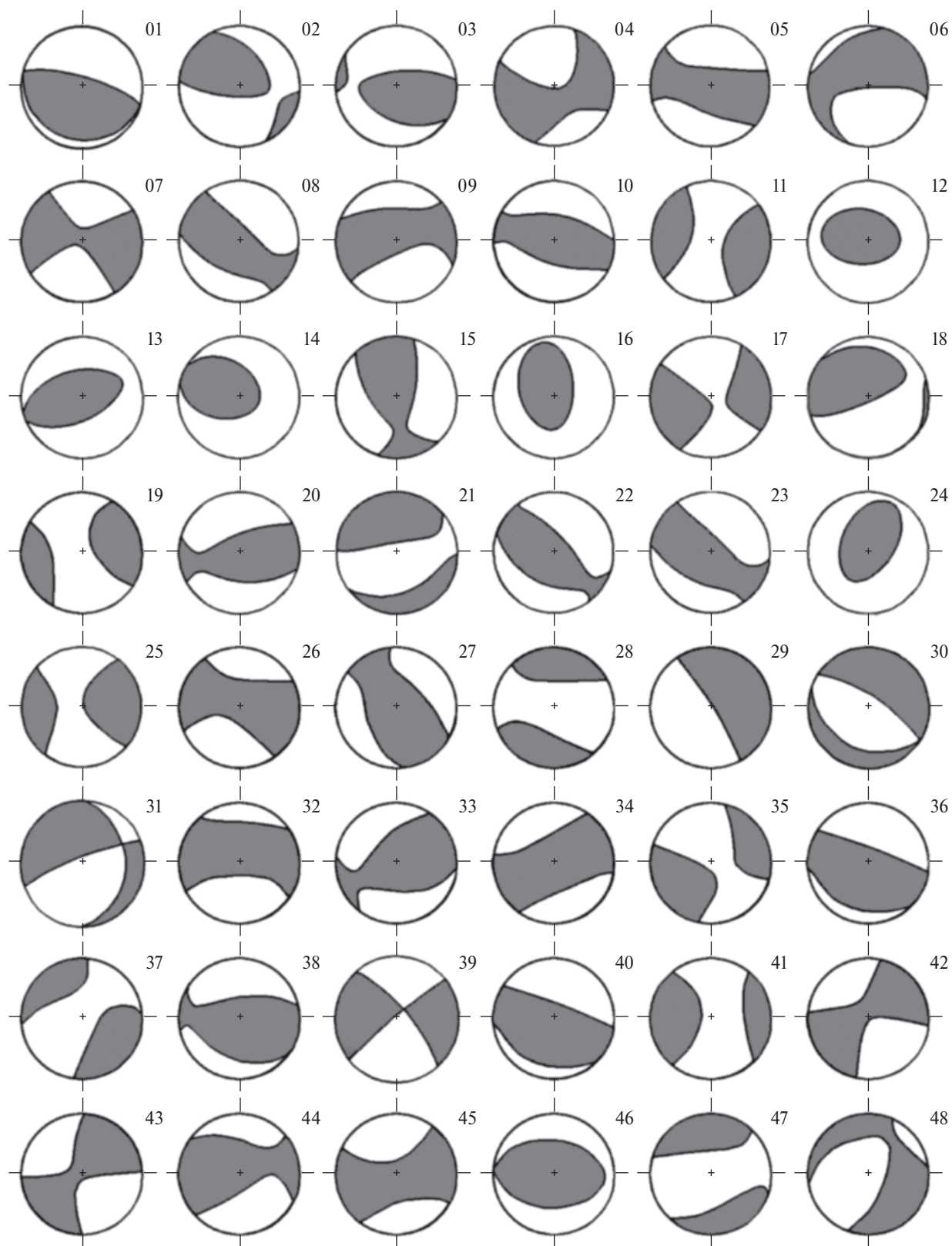


Рис. 5 (начало)

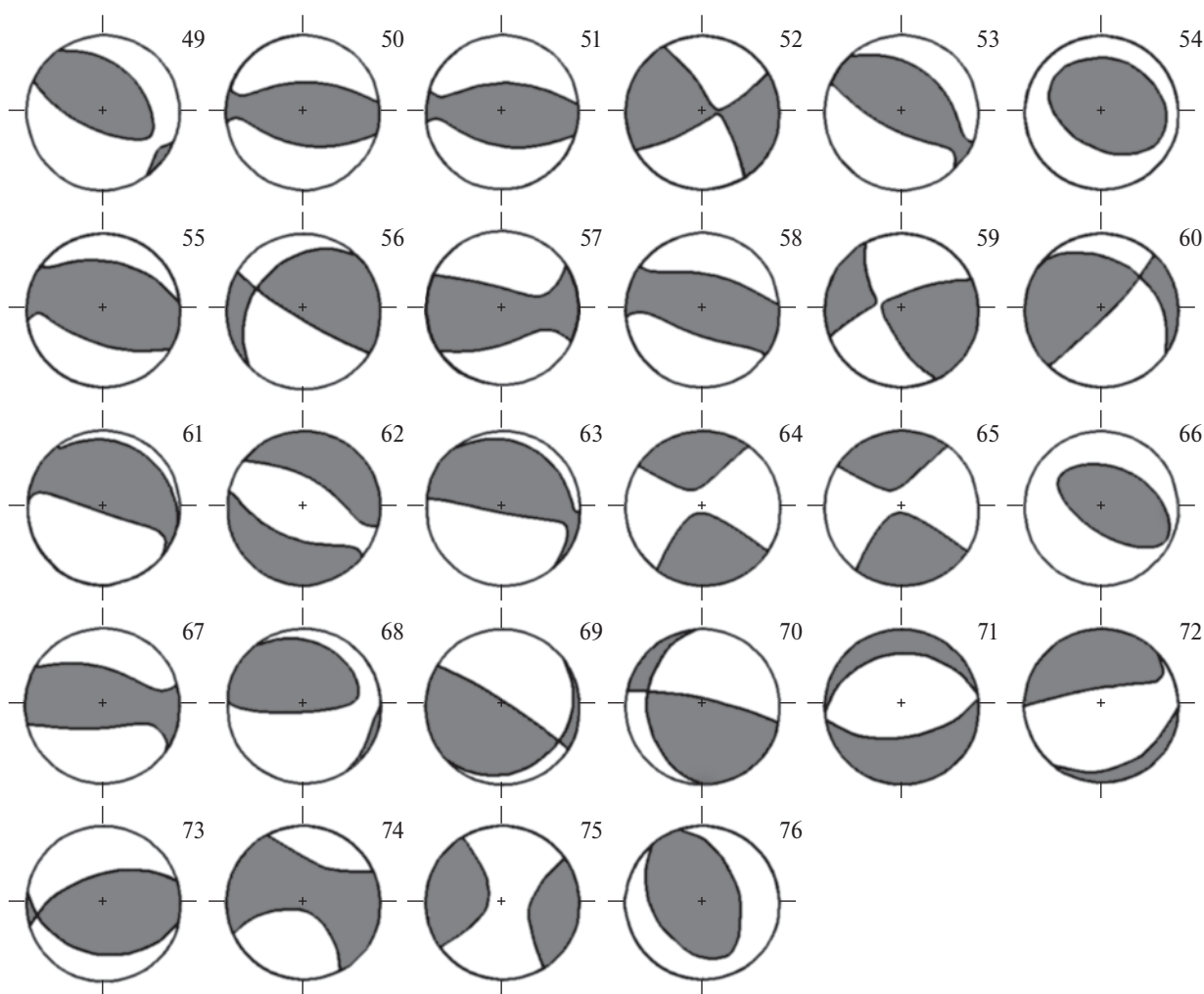


Рис. 5 (продолжение). Графические решения фокальных механизмов землетрясений (СМТ-решения) в проекции на нижнюю полусферу, приведенных в таблице. Решения заимствованы из бюллетеня ISC [www.isc.ac.uk] и из бюллетеня Global Centroid Moment Tensor [www.globalcmt.org]. На рисунках фокальных механизмов зачернена область растяжения.

Лишь семь событий из 76 (с номерами 21, 30, 47, 48, 62, 71 и 72) показывают иную ориентацию главных осей – преобладание субвертикальной ориентации главной оси сжатия *P*. В целом же преобладающая ориентация субгоризонтальных осей сжатия свидетельствует в пользу их направления вкост простираения геологических структур Кавказа. Все эти землетрясения, для которых были получены решения механизмов очагов, произошли на небольших глубинах (менее 35 км, а подавляющее большинство на глубинах менее 20 км) в верхней части земной коры Кавказа.

Пространственное распределение простирааний главных осей сжатия для непересекающихся между собой на отображаемой плоскости решений СМТ на Кавказе приведено на рис. 6. Эти

решения помечены в таблице жирными номерами.

Согласно таблице, а также рис. 5 и рис. 6 можно утверждать, что в пределах сейсмогенного слоя земной коры исследуемой территории преобладает резко выраженный надвиговый тип сеймотектонической деформации при преимущественной горизонтальной ориентации главной оси сжатия *P* и вертикальной ориентации главной оси растяжения *T*. Напряжение горизонтального сжатия материала земной коры осуществляется в азимутальном секторе север–северо-восток, в основном вкост простираения горных хребтов.

Одновременно это означает, что напряжения горизонтального сжатия ориентированы вкост

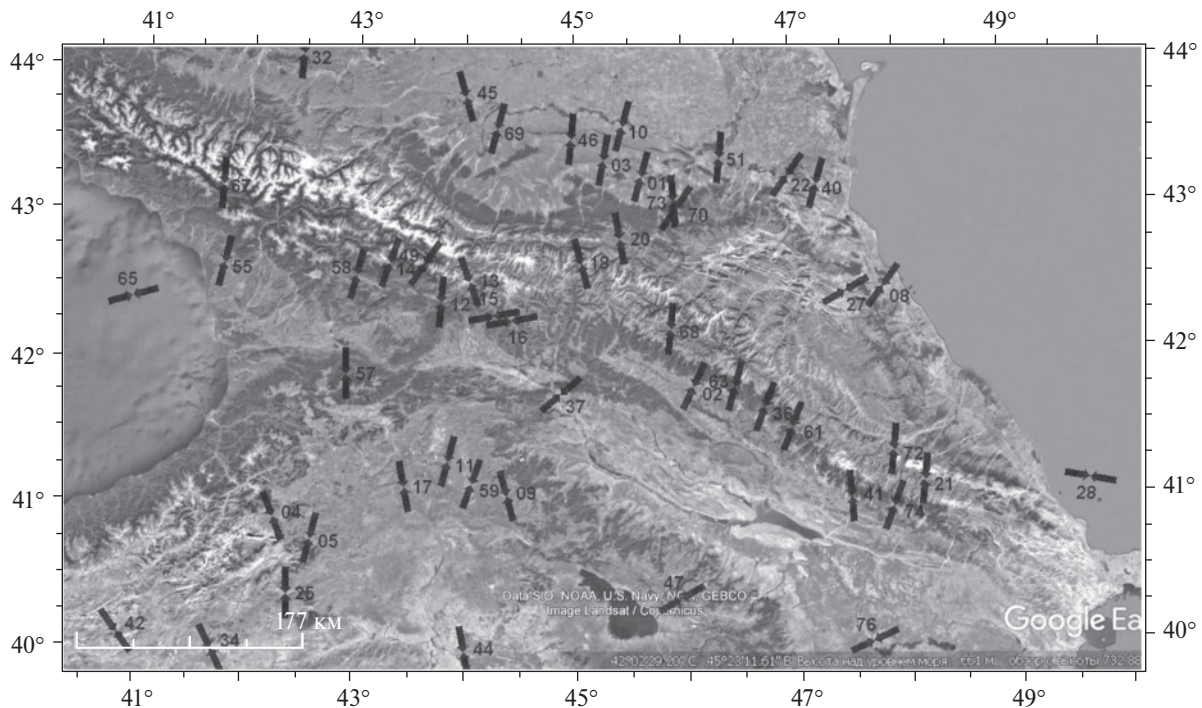


Рис. 6. Пространственное распределение простираний главных осей сжатия фокальных механизмов, помеченных жирными номерами в таблице, для землетрясений с очагами в пределах земной коры Кавказа.

простираения основных надвигов Кавказа, т. е. вкрест простирания основных элементов тектонической структуры этого сооружения, которые сами по себе также указывают на обстановку сжатия. Конкретная ситуация на таких разломах продемонстрирована на примере осетинской части Большого Кавказа (рис. 7). Здесь на схему расположения надвигов, заимствованную из работы [Шевченко и др., 2016], нанесены определения механизмов очагов землетрясений согласно таблице и рис. 5. Оказалось, что надвиговый тип смещений по показанным на рисунке надвигам подтверждается аналогичным (надвиго-подвиговым) типом подвижки в приведенных здесь фокальных механизмах. При этом простирание плоскостей подвижек в очагах землетрясений совпадает с простиранием обсуждаемых надвигов. Мало того, они изменяют свое простирание в строгом соответствии с изменением простирания надвига, что хорошо видно на фокальном механизме за № 16, приведенном на крутом изгибе Орхевского надвига (9 на рис. 7).

В целом продемонстрированная здесь картина сейсотектонического деформирования земной коры Кавказа и смежных территорий согласуется с принятыми на сегодняшний день плитотектоническим представлениям о формировании тектонической структуры территории

Кавказа в результате сжатия в субмеридиональном направлении приближающейся с юга Аравийской литосферной плитой.

К сходным выводам приводит традиционная интерпретация структурно-геологических материалов. Так, например, В.Г. Трифонов [2016] оценил величину «поперечного укорочения» (т. е. уменьшения ширины, сужения – А.Л., В.Ш.) Большого Кавказа преимущественно в 30–50%, а зоны Южного склона этого сооружения – в 50%, т. е. в два раза. На 40–50% (с 62 308 до 28 155 м) сократилась ширина Чиаурской зоны (т. е. зоны Южного склона) по результатам расчетов Ф.Л. Яковлева [2006]. В линейных величинах поперечное сокращение ширины зоны Южного склона, по мнению П.Д. Гамкрелидзе и И.П. Гамкрелидзе [1977], равно 60–100 км (современная ширина зоны около 40–50 км). М.Л. Копп [2007] полагает, что поперечное сокращение зоны Южного склона достигает 150–200 км. Некоторые исследователи, исходя из анализа видимых на поверхности дислокаций, считают, что уменьшение ширины Большого Кавказа равно приблизительно 200–400 км [Баженов и др., 1990; Буртман, 1989; Маринин и др., 2008; Расцветаев и др., 2012]. По палеомагнитным данным общее сужение Большого Кавказа («послемеловое сближение

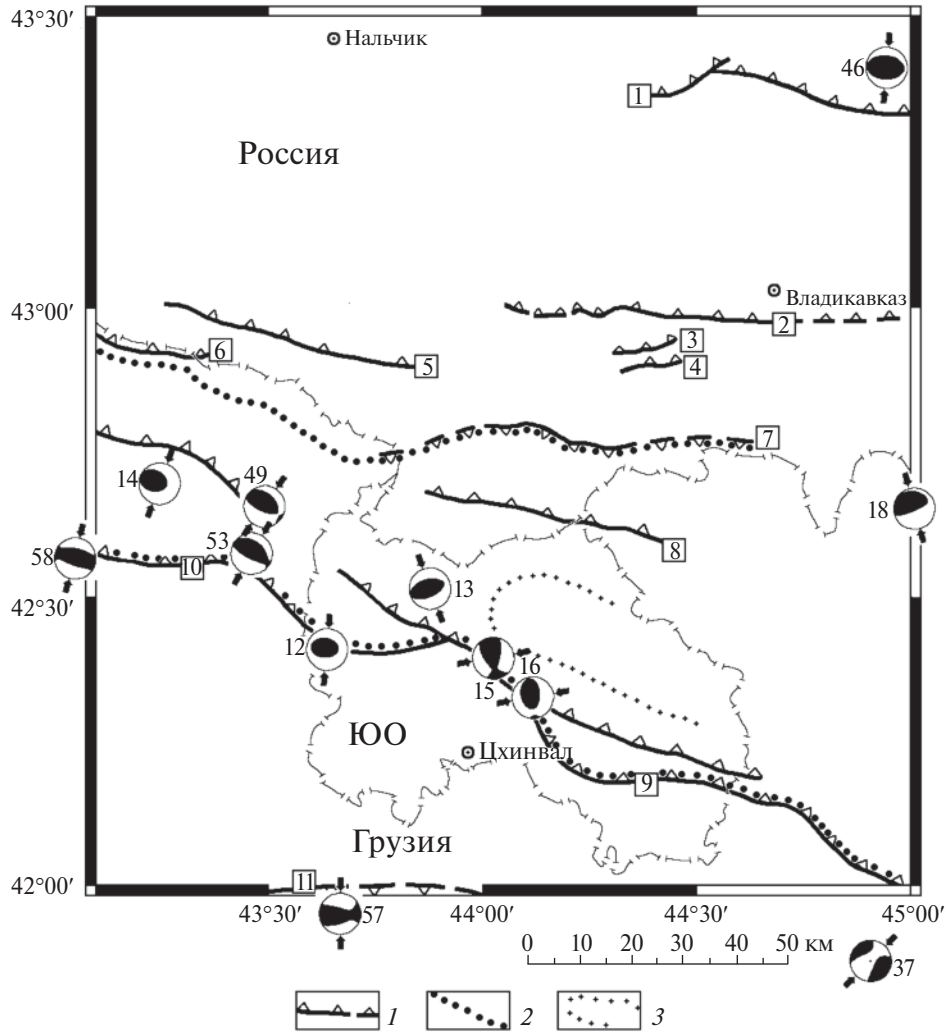


Рис. 7. Сопоставление схемы расположения надвигов осетинской части Большого Кавказа ([Шевченко и др., 2016]) с характером напряжений в очагах землетрясений:

1 – крупные надвиги; 2 – контуры прогиба Южного склона Большого Кавказа; 3 – срединная часть Чиауро-Диббарского синклинория.

Цифры в квадратах – надвиги: «безымянный» (1), Владикавказский (2), Карцинский (3), Моравхохский (4), Адылсу-Харесский (5), Главный надвиг Большого Кавказа (6), Бурон-Ларсский (7), Тибский (8), Орхевский (9), Лечхумский (10), Сурамско-Гокишурский (11); ЮО – Южная Осетия.

Номера рядом с графическими решениями фокальных механизмов соответствуют таблице и рис. 5.

Малого Кавказа и Скифской плиты») оценивается в 900 ± 350 км [Баженов и др., 1990, с. 106; Буртман, 1989, с. 73] или 500–1000 км («последнее сближение Малого Кавказа и Северного склона Большого Кавказа») [Копп, 2007, с. 291].

Сближение Евразийской и Аравийской литосферных плит надежно подтверждено и современными геодезическими измерениями (рис. 1). Казалось бы, что все имеющиеся на сегодняшний день данные свидетельствуют в пользу того, что в геодинамике земной коры Кавказа

ведущую роль играют силы плейттектонического субгоризонтального сжатия вкострости простирающихся основных геологических структур, возникшие в результате поперечного «укорочения» (т. е. уменьшения ширины, сужения) Большого Кавказа при сближении литосферных плит. Однако результаты прямых геодезических (GPS) измерений непосредственно на территории Большого Кавказа не согласуются с этими представлениями, поскольку эти измерения показали, что Большой Кавказ в настоящее время не сужается, а становится шире.

НЕПЛЕЙТТЕКТОНИЧЕСКАЯ GPS-ГЕОДИНАМИКА БОЛЬШОГО КАВКАЗА

Геодезические (GPS) измерения на территории Большого Кавказа проводились в 1991–1997 гг. [Прилепин и др., 1997; Шевченко и др., 1999] и на территории осетинской части Большого Кавказа в 2010–2013 гг. [Милуков и др., 2015; Шевченко и др., 2016; 2017]. Результаты были представлены в трех системах координат – общеземной ITRF, Евразийской (относительно неподвижной Евразии) и местной. Картины, полученные в местных системах координат, представляют в нашем случае наибольший интерес. На соответствующих картах горизонтальные смещения станций и пунктов GPS-измерений показаны относительно разных опорных станций, которые рассматриваются как «неподвижные» – Зеленчук (ZELB) в первом случае (рис. 8) и Ардон (ARDN) во втором (рис. 9). Результаты и тех, и других измерений мы рассматриваем совместно. Во-первых, оба опорных пункта располагаются на относительно стабильных частях Северного Кавказа – Предкавказья. Во-вторых, результаты упомянутых GPS-измерений, при их совмещении на единой карте, оказываются

качественно (по азимутам) и в значительной степени количественно (по величинам скоростей) совпадающими друг с другом.

Опорная станция ZELB находится в пределах стабильной Лабино-Малкинской зоны Северного Кавказа (рис. 8). Мезозойские и кайнозойские отложения зоны практически не дислоцированы. Опорная станция ARDN в Осетии располагается в приосевой части Бесланского прогиба Предкавказья (зона А на рис. 9). Прогиб выполнен относительно мощными толщами кайнозойских, мезозойских и, по-видимому, палеозойских отложений. Перечисленные доступные наблюдению отложения на территории Бесланского прогиба залегают горизонтально и не дислоцированы [Барковская и др., 1960]. Это дает основания предполагать, что в районах расположения опорных станций отсутствуют собственные, местные горизонтальные смещения.

В полосе осетинского пересечения Большого Кавказа южнее Бесланского прогиба, в зоне Главного хребта (зона В на рис. 9) распространены относительно маломощные юрские вулканогенные альбитофиры и осадочные юрские и меловые отложения, налегающие на доальпийский фундамент, сложенный гранитоидами, гнейсами, кристаллическими



Рис. 8. Современная геодинамика Кавказа по GPS-данным (относительно станции ZELB) по измерениям 1991–1997 гг. ([Шевченко и др., 1999], фрагмент).

1 – контуры горных сооружений Большого и Малого Кавказа; 2 – некоторые основные надвиги Кавказа; 3 – разломы зоны Передового хребта; 4 – отложения верхней юры–мела Северного склона Большого Кавказа; 5 – опорная геодезическая станция ZELB; 6 – векторы скоростей горизонтальных смещений геодезических пунктов и их кодовые названия. Зоны: А-Т – Аджаро-Триалеты; Г-Д – Гагро-Джавская; Гл.х – Главного хребта; Л-М – Лабино-Малкинская; О-С – Окрибо-Сачхерская; П.х – Передового хребта; Ч-Д – Чиауро-Дибрарский синклиорий.

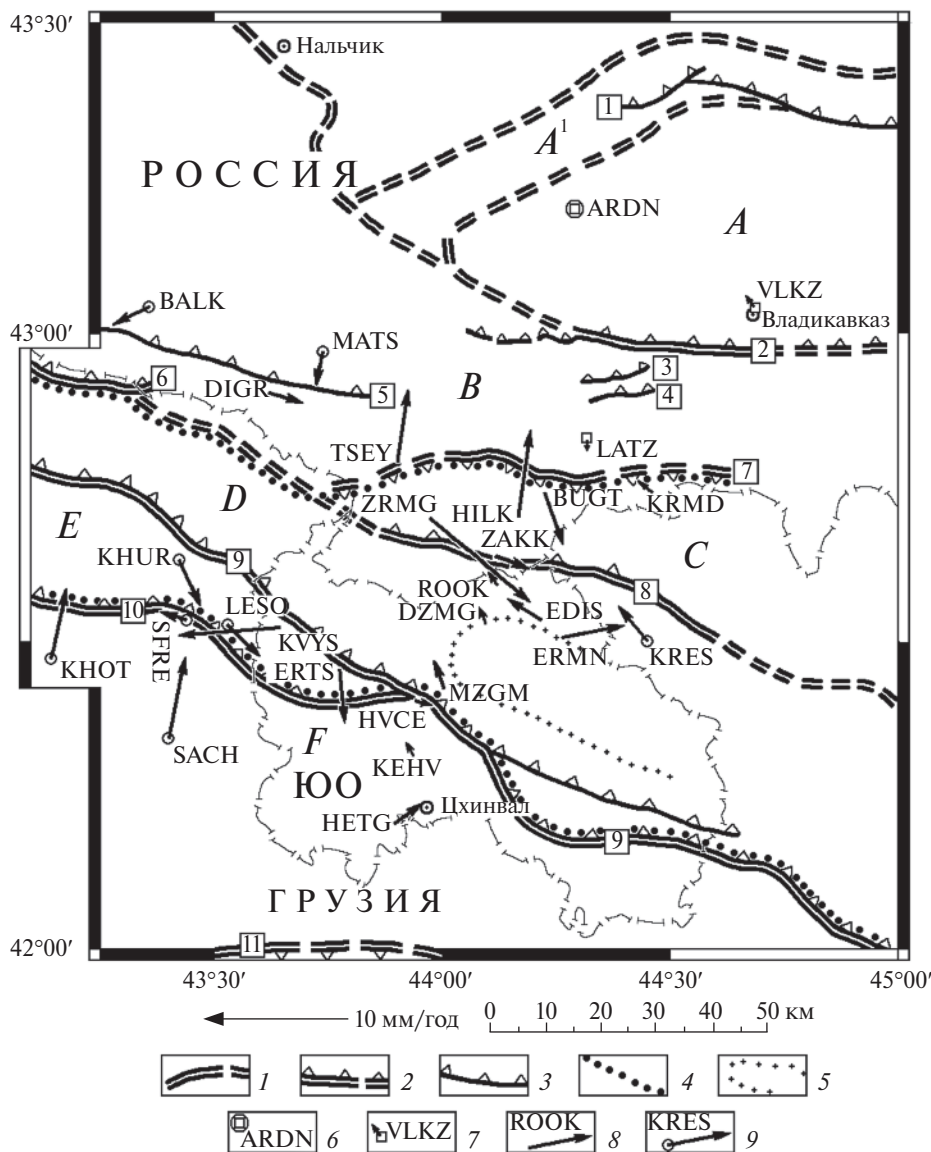


Рис. 9. Векторы скоростей горизонтальных смещений GPS-станций и пунктов в Осетии (относительно станции ARDN) по измерениям 2010–2013 гг. (по [Шевченко и др., 2016; 2017] с дополнениями из работы [Шевченко и др., 1999]). Местоположение рисунка указано на рис. 8:

1–2 – границы элементов тектонической структуры региона (1), в том числе представленные крупными надвигами (2); 3 – некоторые другие надвиги; 4 – контуры прогиба Южного склона; 5 – срединная часть Чиауро-Дибрарского синклинория; 6 – опорная станция ARDN; 7 – GPS-станции, их кодовые названия и векторы скорости горизонтального смещения; 8–9 – GPS-пункты, их кодовые названия и векторы скорости горизонтальных смещений (по [Шевченко и др., 2016; 2017] (8) и [Шевченко и др., 1999] (9)).

A, A', B, C, D, E, F – тектонические зоны (пояснения см. в тексте). ЮО – Южная Осетия.

Цифры в квадратах – границы зон, надвиги: «безымянные» (1), Владикавказский (2), Карчинский (3), Моравохоский (4), Адылсу-Харесский (5), Главный надвиг Большого Кавказа (6), Бурон-Ларский (7), Тибский (8), Орхевский (9), Лечхумский (10), Сурамско-Гокишурский (11).

сланцами; местами встречаются обломочные отложения верхнего карбона [Геология СССР, 1968; Милановский, Хаин, 1963; Панов, Ломизе, 2007]. В зоне B имеется постоянно действующая станция LATZ, которая с небольшой (полный вектор 0.43 мм/год) скоростью смещается в южном направлении. При этом она удаляется

(в меридиональном направлении) от опорной станции ARDN. В том же южном (юго-восточном) направлении смещается располагающийся западнее пункт DIGR (2.42 мм/год). Пункты MATS, BALK и ULCA в западной части названной зоны (рис. 8, рис. 9) смещаются, по результатам GPS-измерений 1991–1997 гг., таким же

образом в южном (юго-западном, запад-юго-западном) направлении, но относительно опорной станции ZELB и удаляются (в меридиональном направлении) от этой последней. Эти южновергентные смещения соответствуют имеющимся геологическим данным о ведущей роли в структуре рассматриваемой части Большого Кавказа южновергентных надвигов (надвиги Адьлсу-Харесский, Главный надвиг Большого Кавказа, ряд восторостепенных [Шевченко и др., 2017]).

Обратим внимание на то, что здесь и далее, характеризуя смещения GPS-пунктов и станций, мы, если приводим точные цифровые оценки измеренных скоростей смещений, имеем в виду полные векторы смещений (в горизонтальной плоскости). Но, по сути дела, нас интересует, в первую очередь, ориентированы ли смещения (в каждом крупном структурном подразделении рассматриваемой части Большого Кавказа) в северном или в южном направлениях. Более детальной информацией о скоростях и азимутах смещений в настоящее время можно пока пренебречь. Дело в том, что перемещения GPS-пунктов и станций относительно опорных, «неподвижных» станций должны различаться качественно, принципиально — в зависимости от того, каким механизмом эти перемещения вызваны. Если действует плейттектонический механизм сжатия, сдавливания, сужения сближающимися литосферными плитами (блоками, платформами и т. д.), то GPS-пункты и станции будут приближаться к опорной «неподвижной» станции. Например, к станции ARDN при смещении в северном направлении под воздействием северного дрейфа Аравийской плиты. Если же функционирует предлагаемый нами автономный механизм, связанный с объемным распором слоистых горных пород, это должно проявиться в увеличении ширины Большого Кавказа и в соответствующем удалении пунктов и станций в зоне Главного хребта от опорной станции ARDN в южном направлении. Поэтому в названной зоне все смещения в ЗЮЗ, ЮЗ, ЮВ, ВЮВ и тому подобных направлениях будут пока рассматриваться как смещения в южном направлении, как южновергентные смещения. Пересчет величин полных векторов на направление вкост простирания Большого Кавказа не производился, т. к. направление вкост для Большого Кавказа не слишком отличается от меридионального.

Южнее зоны *B* в Осетии располагается полоса так называемых «основных сланцев» (зона *C*, рис. 9). Эта зона сложена мощными ниже- и среднеюрскими песчано-сланцевыми

отложениями. Структурно-геологически они образуют северное крыло прогиба Южного склона Большого Кавказа [Шевченко, 1984; Шевченко и др., 2017]. Но традиционно (исходя из местоположения в орографии региона) «основные сланцы» включают в зону «центрального сланцевого поднятия Восточного Кавказа» [Милановский, Хаин, 1963] или «Восточной зоны погружения антиклинория Главного Кавказского хребта» [Гамкрелидзе, 1964], полагая, что тектонически они подставляют по простиранию собственно зону Главного хребта Центрального Кавказа. GPS-пункты ZRMG, BUGT и ZAKK в полосе «основных сланцев» смещаются (со скоростями 8.97, 3.86 и 2.41 мм/год, соответственно) в южном направлении, удаляясь от опорного пункта ARDN. Это связано, по-видимому, с продолжающимся в настоящее время формированием Абайтикауского, Адайком-Казбекского, Шаухохского, Тибского и ряда других южновергентных надвигов, рассекающих названные отложения.

Таким образом, геодезические измерения смещений станций и пунктов и в 1991–1997 гг., и в 2010–2013 гг. выявили современное расширение (вкост простирания) зоны Главного хребта Большого Кавказа.

По северной периферии зоны Главного хребта (зоны *B*) Большого Кавказа протягивается полоса осадочных пород верхней юры–мела. В пределах большей части этой полосы породы указанного возраста наклонены под разными, преимущественно небольшими, углами в северном направлении. Они входят в состав Северокавказской моноклинали (Северный склон зоны Главного хребта). В средней ее части на территории Кабардино-Балкарии, Северной Осетии, Ингушетии и Чечни породы верхнеюрского-мелового и кайнозойского возрастов нарушены целой серией чешуйчатых надвигов, наклоненных в северном направлении (надвиги Скалистого хребта и Черных гор) (рис. 8). В Осетии это Владикавказский, Карцинский, Моравхохский и Кариухохский надвиги (рис. 9). Перемещения по этим надвигам, судя по имеющимся геологическим данным [Барковская и др., 1960; Варданянц, 1933; 1935; Милановский, 1968; Ренгартен, 1932; Шевченко, 1984; Шевченко и др., 2017] происходили в южном направлении. В восточной части Большого Кавказа породы указанного возраста вскрываются на территории Известнякового Дагестана. Здесь они образуют крупные складки коробчатой формы [Барковская и др., 1960], в разной степени наклоненные или опрокинутые в южном направлении.

В западной части рассматриваемой полосы в пределах Северокавказской моноклинали располагаются геодезические пункты BEUG и SHAT, а в восточной, в Известняковом Дагестане – пункт DUBK [Шевченко и др., 1999; 2017] (рис. 8). Все три пункта смещаются в южном направлении со скоростями 3.6, 2.4 и 8.1 мм/год соответственно. Эти пункты, следовательно, смещаются в общем в том же южном направлении, что и упомянутые выше пункты зон В и С (рис. 8, рис. 9).

Таким образом, в пределах полосы Северокавказской моноклинали на северном склоне Большого Кавказа и в зоне собственно Главного хребта Большого Кавказа, с одной стороны, зафиксированы (по геологическим данным) южновергентные чешуйчатые надвиги, а с другой – установлены (по GPS-измерениям) ориентированные таким же образом (относительно «неподвижных» опорных пунктов ZELB и ARDN) смещения целой группы геодезических пунктов. Это делает неизбежным предположение о современных южновергентных смещениях по надвигам Скалистого хребта, в полосе которых GPS-измерения пока не были проведены.

Перечисленные южновергентные смещения надвигов на Северном склоне Большого Кавказа и в зоне собственно Главного хребта иногда связывают с соответствующим движением «...северного континентального обрамления Тетиса (Евразии – А.Л., В.Ш.) к югу...» [Панов, 2013, с. 80]. Но они не могут быть объяснены таким образом, в частности потому, что это объяснение неприменимо к аналогичным смещениям GPS-станций и пунктов. Дело в том, что эти станции и пункты, как отмечено выше, не просто смещались к югу. Они удалялись (в обстановке сжатия согласно сейсмологическим данным) от опорных станций ZELB и ARDN. В случае давления Евразии с севера станции ZELB и ARDN должны были бы смещаться к югу вместе с другими станциями и пунктами зоны Главного хребта и Северного склона. Расстояния между ними при этом могли либо оставаться неизменными, либо уменьшаться в результате общего сжатия, но никак не увеличиваться.

Следует заметить, что смещения некоторых единичных разрозненных GPS-пунктов рассматриваемой части территории Осетии отличаются от отмеченных выше. Так, например, пункт HILK в пределах этой же зоны С, в отличие от расположенных вокруг него пунктов ZRMG, BUGT и ZAKK, смещается в северном направлении. Такая «аномальность» этого

пункта позволяет предположить его возможную неустойчивость или наличие местной невыявленной дислокации. Поэтому до последующей проверки приходится исключить этот пункт из рассмотрения. По тем же причинам приходится исключить также пункт TSEY, также смещающийся в северном направлении.

На фоне перечисленных выше пунктов Северного склона и зоны Главного хребта, смещающихся в южном направлении, на территории региона аномальными выглядят геодезические пункт ZURA и станция VLKZ, которые имеют небольшие северные векторы скорости смещения (рис. 9 и рис. 10). Здесь ситуация несколько иная. Пункт ZURA находится на висячем крыле наклоненного в северном направлении надвига, входящего в состав Хадумской группы надвигов в Дагестане. Судя по вполне очевидным геологическим данным, по этим надвигам происходило южновергентное надвигание [Барковская и др., 1960; Шатский, 1925; 1927; 1929]. Можно предположить, что столь явное расхождение геологических и геодезических данных связано с тем, что непосредственно южнее плоскости надвига вскрывается полоса глинистых, очень пластичных пород майкопской свиты олигоценового-нижнемиоценового возраста. Здесь Н.С. Шатским установлено пяти-шестикратное повторение отдельных частей разреза майкопской свиты благодаря смещениям по южновергентным надвигам второго-третьего порядка (см. рис. 2.7 в работе [Шевченко и др., 2017]). В этом случае нагнетаемые породы майкопской свиты могут отеснять к северу висячее крыло рассматриваемого надвига, что, возможно, будет маскировать его ожидаемое собственное надвиговое перемещение в южном направлении.

Станция VLKZ занимает сходное положение в структуре региона на южном крыле Бесланского прогиба, в полосе Черногорской моноклинали, несколько севернее южновергентного Владикавказского надвига, но смещается в северном направлении. Как и в предыдущем случае, южнее надвига на дневной поверхности вскрывается полоса пластичных глин майкопской свиты. Вероятно, объяснение, предложенное выше для «аномального» смещения пункта ZURA, применимо и относительно аналогичного северного смещения пункта VLKZ.

К югу от зоны Главного хребта располагается прогиб Южного склона. Этот прогиб включает Сванетскую зону (в пределах рассматриваемой территории представлена Чиауро-Диббарским

синклиниорием) и Гагра-Джавскую зону (рис. 8, рис. 9).

Чиауро-Дибрарский синклиниорий (зона *D* между Тибским и Орхевским южновергентными надвигами) сложен мощными флишоидными отложениями нижнего мела и верхней юры. Под ними предполагаются не менее мощные песчано-сланцевые отложения нижней и средней юры, а в основании разреза — слабо метаморфизованные отложения триаса и палеозоя. В составе структуры синклиниория в Осетии четко выделяются приосевая, срединная часть синклиниория и его северное и южное крылья [Шевченко, 1984; Шевченко и др., 2017]. В приосевой части можно видеть складки коробчатой или близкой к коробчатой формы, располагающиеся примерно на одном гипсометрическом уровне. Для северного крыла характерны сильно сжатые, вплоть до изоклинальных складки со стреловидными замками, с круто наклоненными или близвертикальными осевыми плоскостями. На южном крыле располагаются сильно сжатые складки, опрокинутые в южном направлении. По Орхевскому надвику они контактируют (в полосе долины реки Большая Лиахва) с Закавказской зоной (с Грузинской глыбой, т. е. с зоной *F* на рис. 9) (см. [Шевченко и др., 2017]).

Гагра-Джавская зона (зона *E*) располагается в южной части прогиба Южного склона. Она с севера ограничена наклоненным в северном направлении Орхевским надвигом, а с юга — узким Рача-Лечхумским прогибом, выполненным меловыми, палеогеновыми и миоценовыми отложениями, который отделяет ее от Грузинской глыбы. Прогиб резко асимметричен, у него пологое южное и крутое, местами опрокинутое на юг, северное крыло, вдоль которого проходит аналогично ориентированный Лечхумский надвиг, крупная Лечхумская разломная зона. Эти геологические данные указывают на южную вергентность Лечхумской разломной зоны. С приближением к долине Большой Лиахвы Гагра-Джавская зона выклинивается. В названной зоне, как и в Чиауро-Дибрарском синклиниории, широко распространены очень мощные песчано-сланцевые нижнеюрские отложения и (в отличие от названного синклиниория) мощные среднеюрские основные вулканогены «порфиритовой юры». Для этих пород отмечены сжатые, опрокинутые в южном направлении складки, осложненные соответственно ориентированными разломами. Выше несогласно залегают красноцветы верхней юры.

Таким образом, тектоническая структура зоны Южного склона, особенно ее северного и южного крыльев, свидетельствует о ее формировании в обстановке интенсивных напряжений субгоризонтального, вкрест простирания сжатия.

Геодезические пункты ROOK, DZMG, EDIS и ERMN, располагающиеся на северном крыле прогиба Южного склона, в пределах северного крыла Чиауро-Дибрарского синклиниория, смещаются с различными скоростями (0.93, 1.03, 2.76 и 4.39 мм/год, соответственно), с разбросом по азимуту, но, тем не менее, устойчиво в северном направлении. Полоса сильно сжатых складок северного крыла синклиниория прослеживается по простиранию в ВЮВ направлении в район Крестового перевала на Военно-Грузинской дороге. Здесь располагается GPS-пункт KRES, который также смещается (3.53 мм/год относительно станции ZELB) в северном направлении (рис. 8, рис. 9).

GPS-пункты KHUR и LESO (см. рис. 8, рис. 9, скорости 3.73 и 2.20 мм/год, соответственно, относительно станции ZELB) и пункты ERTS и KVYS (см. рис. 9, скорости 3.94 и 7.05 мм/год относительно станции ARDN) на южном крыле прогиба Южного склона, в пределах Гагра-Джавской зоны смещаются в южном направлении, что соответствует отмеченной выше южной вергентности упомянутых геологических дислокаций.

Таким образом, геодезические пункты на северном крыле Чиауро-Дибрарского синклиниория, т. е. на северном крыле прогиба Южного склона, смещаются в северном направлении. В то же время все пункты в Гагра-Джавской зоне, т. е. на южном крыле прогиба Южного склона, смещаются в южном направлении. Это позволяет говорить о том, что ширина прогиба Южного склона увеличивается. Уже упоминалось об увеличении ширины зоны Главного хребта. Увеличивается, следовательно, ширина Большого Кавказа в целом.

Такое сочетание деформаций и напряжений субгоризонтального сжатия (по геологическим и сейсмотектоническим данным) и одновременного увеличения линейных размеров (здесь речь идет об измеренном увеличении ширины по геодезическим данным) одного и того же элемента тектонической структуры земной коры может быть, на наш взгляд, непротиворечиво объяснено только объемным расширением, объемным распором слоистых горных пород этого элемента структуры (в данном случае — Большого

Кавказа) [Шевченко, 1984; Шевченко и др., 2017]. Подобный распор будет воспринят как напряженное состояние сжатия при изучении фокальных механизмов землетрясений.

В пределах прилегающей Окрибо-Сачхерской зоны, которая является краевой, несколько опущенной частью смежной Грузинской глыбы (Закавказская зона, зона *F* на рис. 9) на неглубоко расположенном древнем кристаллическом фундаменте залегают маломощные осадочные нижнеюрские, относительно мощные основные вулканогенные среднеюрские («порфирировая юра») и терригенные третичные отложения переменной мощности. Геодезические пункты, располагающиеся в пределах этой зоны, смещаются в северном направлении – пункты HETG и KENV (2.37 и 0.99 мм/год, соответственно) (рис. 9), пункты KNOT и SACH (4.80 и 5.35 мм/год соответственно), (рис. 8, рис. 9). Приведенные данные о северном смещении названных пунктов на Грузинской глыбе были интерпретированы рядом авторов как свидетельство пододвигания последней под смежные структурные элементы Большого Кавказа [Прилепин и др., 1997; Рогожин, 1993; Reilinger et al., 1997]. Для обоснованного суждения по этому вопросу необходимо иметь более полные данные о современных смещениях других частей Грузинской глыбы.

Широко распространено представление о том, что северное смещение Грузинской глыбы привело к соответствующему уменьшению ширины Большого Кавказа в целом, но, как это следует из предыдущего, это не соответствует действительности. Ширина Большого Кавказа увеличивается по рассмотренной выше совокупности данных GPS-измерений.

К югу от Грузинской глыбы – Дзирульско-го массива – располагается Аджаро-Триалетское складчато-надвиговое сооружение, входящее в состав Малого Кавказа. Оно сложено меловыми–палеогеновыми карбонатными, туфогенными и вулканогенными отложениями. Этому сооружению соответствует глубокий прогиб кровли домелового или, возможно, до-среднеюрского фундамента [Гамкрелидзе И.П., 1976; Гамкрелидзе П.Д., 1949; Резанов и др., 1978]. Южнее этого сооружения находится Арвино-Болнисская глыба консолидированного фундамента. Северное крыло Аджаро-Триалет состоит из нескольких надвиговых пластин, в основании которых располагается сложный Сурамско-Гокишурский надвиг. Надвиги наклонены в южном направлении, перемещения

пластин происходили (по геологическим данным) в северном направлении [Гамкрелидзе И.П., 1976; Гамкрелидзе П.Д., 1949]. На этом крыле сооружения располагаются геодезические пункты VANI и NICH, смещающиеся в северном направлении (4.2 и 6.0 мм/год, соответственно) (рис. 8). Аналогично ориентированное смещение установлено в пункте NINO (4.3 мм/год).

СООТНОШЕНИЕ АЛЬПИЙСКОЙ (МЕЗОЗОЙ–КАЙНОЗОЙ) И СОВРЕМЕННОЙ (GPS) ГЕОДИНАМИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ БОЛЬШОГО КAVKAZA

Таким образом, имеется явное противоречие между тектонической структурой и сейсмотектонической деформацией Большого Кавказа, свидетельствующих о поперечном, вкrest его простирающемся напряжении сжатия, и, в соответствии с распространенными представлениями, о соответствующем сужении этого сооружения, с одной стороны, и результатами геодезических измерений, объективно фиксирующих современное увеличение ширины орогена, с другой. Может возникнуть предположение, что отмеченное противоречие связано с тем, что альпийская тектоническая структура формировалась в мезозое и кайнозое, в течение предыдущих приблизительно 200 млн лет, а GPS-измерения фиксируют картину сегодняшнего дня. И эта картина, предположительно, не имеет никакой или, во всяком случае, прямой связи с результатами предшествующего коллизионного процесса тектогенеза.

Однако это не так. Связь между альпийской тектонической структурой Большого Кавказа и современными смещениями геодезических пунктов проявлена вполне ясно.

Во-первых, выше уже неоднократно отмечалось, что ориентировка векторов скоростей современных горизонтальных смещений геодезических пунктов в подавляющем большинстве случаев соответствует вергентности тектонических дислокаций Кавказа, реконструируемой геологическими методами. Такое соответствие указывает на то, что современные смещения элементов тектонической структуры региона, устанавливаемые по данным GPS-наблюдений, – это продолжение альпийского (мезозойско-кайнозойского) процесса формирования этих элементов. Из всех пунктов рассмотренной GPS-сети на Большом Кавказе и в Аджаро-Триалетах Малого Кавказа, структурно-геологическое

положение которых установлено (станции ZELB и ARDN, как исходные, опорные, занимают особое положение), только единичные разрозненные пункты – TSEY, HILK, MZGM, HVCE, ZURA, VLKZ – не укладываются в изложенную картину соответствия альпийской надвиговой кинематики элементов структуры региона и современных смещений пунктов и станций GPS. Это отличие названных пунктов может быть связано как с наличием каких-то местных, локальных деформаций (например с упомянутым выше нагнетанием пластичных майкопских глин для пунктов ZURA и VLKZ), так и с простой технической неустойчивостью отдельных пунктов, чего нельзя исключить полностью.

В зоне Главного хребта Большого Кавказа на территории Балкарии–Северной Осетии удастся более детально проследить прямое соответствие альпийских (мезозой–кайнозой) и современных (GPS) смещений элементов тектонической структуры на ряде геологических профилей, местоположение которых указано на рис. 10, сами профили показаны на рис. 11.

Сама зона Главного хребта представляет мощный комплекс надвиговых пластин кристаллических пород древнего основания с ясно выраженной южной вергентностью [Геология СССР, 1968; Милановский, Хаин, 1963; Хаин, 1984]. В верховьях р. Черек Балкарский фронтальной, южной частью этого комплекса надвиговых пластин служит опрокинутая на юг антиклиналь Лъкези (рис. 11а). Формирование антиклинали, по-видимому, связано с подворотом толщ горных пород фундамента при перемещении в южном направлении этого комплекса пластин. Северное более пологое крыло антиклинали осложнено Адылсу-Харесским и Тютюнским южновергентными надвигами. Южное круто наклоненное (до опрокидывания) крыло нарушено также южновергентным разрывом. Этот последний в ЗСЗ направлении, по простиранию зоны Главного хребта, по-видимому, подставляется (или продолжается) южновергентным надвигом Главного хребта (Главным надвигом Большого Кавказа).

На крыльях антиклинали Лъкези на кристаллические породы ядра складки налегают осадочные отложения нижней и средней юры – кистинской (синемюр–нижний плинсбах [Панов, Ломизе, 2007]) и следующих выше по разрезу циклаурской, казбекской и гудошаурской свит (на южном крыле складки) и их аналоги (на северном крыле). В сторону свода складки на древнее основание один за другим переходят отложения вышележащих членов этой последовательности – вплоть до нижнеюрских (тоар) отложений ниже-среднеюрской ардонской серии (вероятно, ксуртской и джимаринской свит). В смежном с антиклиналью Лъкези прогибе Южного склона на ниже- и среднеюрские отложения налегают флишевые отложения нижнего мела. В северном направлении, с приближением к антиклинали Лъкези они последовательно переходят на все более древние части разреза нижней и средней юры.

Подобное уменьшение мощности и полноты разреза перечисленных ниже- и среднеюрских отложений на своде названной антиклинали (или в сторону свода антиклинали)

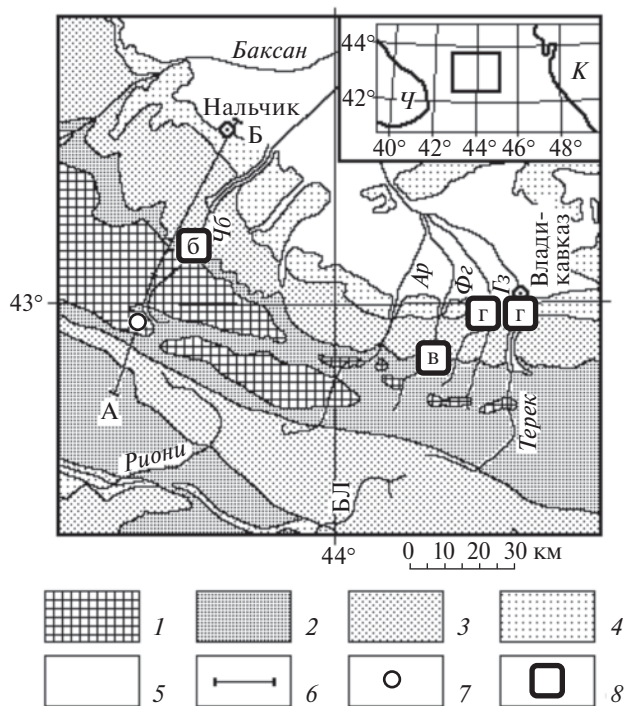


Рис. 10. Схематизированная геологическая карта части территории Большого Кавказа и расположение геологических профилей, показанных на рис. 11. На врезке – расположение рассматриваемого региона (Ч – Черное море, К – Каспийское море).

1 – доюрские отложения и породы; 2 – отложения нижней и средней юры; 3 – отложения верхней юры и мела; 4 – отложения палеогена и неогена; 5 – отложения четвертичные; 6 – линия геологического профиля А-Б; 7 – местоположение антиклинали Лъкези (см. рис. 11 а); 8 – местоположение профилей через Зылгинскую (б) и Ханикомскую (в) антиклинали, а также вдоль рек Гизельдон и Терек в зоне Владикавказского разлома (г, г). Обозначения рек: Ар – Ардон, БЛ – Большая Лиахва, Гз – Гизельдон, Фз – Фиагдон, ЧБ – Черек Балкарский.

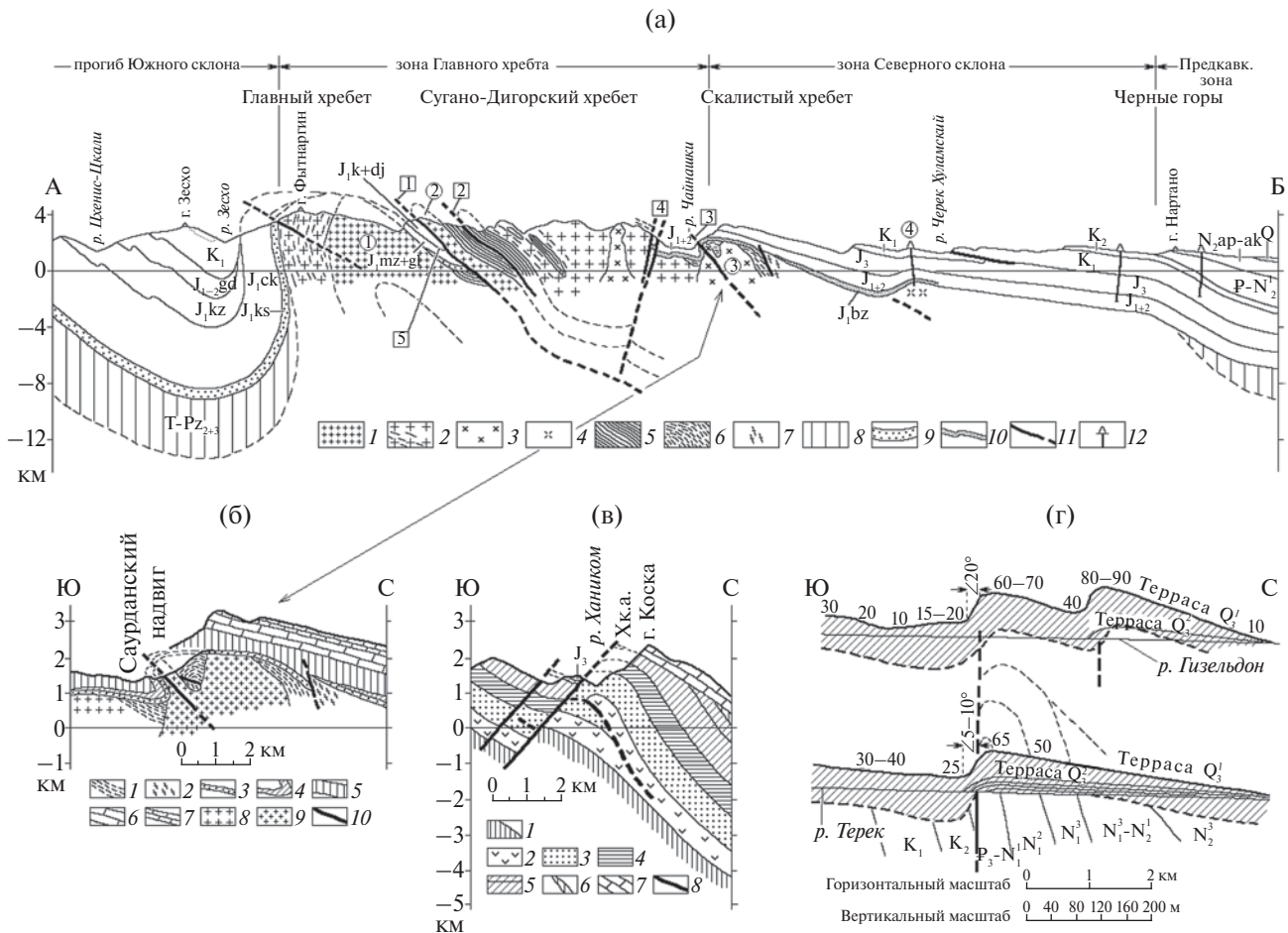


Рис. 11. Геологические профили через некоторые элементы тектонической структуры Большого Кавказа. Местоположение профилей см. на рис. 10:

(а) – геологический профиль А–Б через зону Главного хребта Большого Кавказа и прогиб Южного склона по левому борту долин р. Черек Балкарский–р. Зесхо [Шевченко, 1984; Шевченко и др., 2017]. Вертикальный и горизонтальный масштабы одинаковые:

1 – плагиограниты блыбского типа (γPz_1 ?); 2 – гранитоиды и гнейсогранитоиды балкарского типа (γPz_2); 3 – граниты улукамского типа (γPz_3); 4 – граниты неясного типа; 5–7 – кристаллические сланцы, гнейсы уллучиранской свиты (5), нижнебезенгийской подсвиты (6) и верхнебезенгийской подсвиты (7) (Pt_3); 8 – отложения среднего палеозоя – триаса нерасчлененные; 9–10 – отложения нижнеюрских кистинской (J_1ks) (9) и безингийской (J_1bz) (10) свит; 11 – надвиги, взбросы; 12 – буровые скважины.

Свиты: J_1ks – кистинская; J_1bz – безингийская; J_1ck – циклаурская; $J_1mz + gl$ – мизурская и галиатская; J_1kz – казбекская; $J_1k + dj$ – ксуртская и джимаринская (?) ардонской серии; $J_{1-2}gd$ – гудошаурская.

Цифры в кружках: 1–4 – антиклинали: Лъкези (1), Суганская (2), Зылгинская (3), Церикгельская (4).

Цифры в квадратиках: 1–3 – надвиги Адылсу-Харесский (1), Тютюнский (2), Саурданский (3); 4 – Шаурдатский взброс; 5 – Штулу-Харесская поднадвиговая депрессия;

(б) – геологический профиль по левому борту долины р. Черек Балкарский через Зылгинскую антиклиналь в зоне Главного хребта Большого Кавказа [Шевченко, 1971; 1984]:

1 – кварц-биотитовые и кварцитовые сланцы нижнебезенгийской подсвиты (Pt_3); 2 – амфиболовые и кварц-биотитовые сланцы верхнебезенгийской подсвиты (Pt_3); 3 – песчаники и гравелиты верхнеплинсбахской безингийской свиты; 4 – песчаники, алевролиты, аргиллиты среднетоарской-ааленской джигиатской свиты; 5 – аргиллиты с покровами лав и туфов среднего и кислого состава байосской джорской свиты; 6 – массивные известняки оксфордского яруса, в основании маломощные терригенные и карбонатные отложения келловея; 7 – плитчатые известняки и доломиты киммериджского яруса; 8 – среднепалеозойские биотитовые граниты балкарского типа; 9 – позднепалеозойские двуслюдяные граниты улукамского типа; 10 – надвиги;

(в) – геологический профиль в долине р. Фиагдон через Ханикомскую антиклиналь в зоне Главного хребта Большого Кавказа [Шевченко, 1972; 1984]:

1 – доальпийские образования нерасчлененные; 2 – альбитофиры верхнесинемюрской-нижнеплинсбахской садонской свиты; 3 – песчаники верхнеплинсбахской мизурской свиты; 4 – аргиллиты нижнетоарской галиатской свиты; 5 – песчаники, алевролиты, аргиллиты среднетоарской-нижнеааленской и верхнеааленской толщ ардонской серии; 6 – терригенные отложения байосской-згидской свиты; 7 – массивные известняки оксфордского яруса, в основании маломощные терригенные и карбонатные отложения келловея; 8 – надвиг и сбросы.

(г) – продольные профили долин рек Гизельдон и Терек в зоне Владикавказского разлома. Штриховкой показана редантская толща Q_3^1 . Все отметки террас приведены в метрах. Составил Е.Е. Милановский [1968].

означает, что во время, когда накапливались эти отложения, складка уже существовала, испытывала восходящее перемещение и ей соответствовало абсолютное поднятие. Как уже упоминалось, образование этой антиклинали, судя по ее положению во фронтальной части комплекса надвиговых пластин пород фундамента зоны Главного хребта, происходило в результате подворота толщ, «слоев» этих пород в процессе южновергентного перемещения пластин. Вертикальная восходящая компонента этого смещения по полого наклоненным разрывным нарушениям явилась причиной поднятия антиклинали и соответствующего сокращения мощности и полноты разреза на ее своде. Таким образом, и рост антиклинали, и, следовательно, соответствующее южновергентное перемещение надвиговых пластин зоны Главного хребта (по Главному и, вероятно, по аналогичным надвигам) происходили уже в раннеюрское (синемюрское, плинсбахское и более позднее) время и продолжались в предмеловое время. Вдоль границы зон Главного хребта и Южного склона, т. е. в полосе надвига Главного хребта по серии параллельных друг другу «крупных взбросовых зон» отмечаются смещения в плиоцене и антропогене [Никитин и др., 1993].

В верховьях р. Фиагдон (рис. 10) располагается структурный и, следовательно, кинематический аналог антиклинали Лькези – Фиагдонская антиклиналь (см. рис. 2.6, 2.15 в работе [Шевченко и др., 2017]). Строение ядра этой антиклинали свидетельствует о том, что ее образование в ходе южновергентного смещения в зоне Главного хребта происходило уже в интервале времени пермь–триас.

Смещения южновергентных надвиговых пластин второго порядка в зоне Главного хребта на территории Осетии отмечено для предпозднеюрского времени. Мы имеем в виду опрокинутую на юг Зылгинскую антиклиналь в долине р. Черек Балкарский (см. рис. 11а, 11б) и наклоненную на юг Ханикомскую антиклиналь на р. Фиагдон (рис. 11в) [Шевченко, 1971; 1972; 1984]. В строении и той, и другой участвуют нижне- и среднеюрские отложения. Верхнеюрские (рис. 11в) или байосские и верхнеюрские (рис. 11б) перекрывают их с угловым несогласием. Складки в разной степени осложнены южновергентными надвигами. Ханикомская, судя по имеющимся данным, представляет фронтальную часть надвиговой пластины. Необходимо также упомянуть наклоненную на юг Церикгельскую антиклиналь на Черке Балкарском (рис. 11а), формировавшуюся, судя

по изменениям мощностей отложений, в позднеюрское и, возможно, раннемеловое время.

В полосе Северного склона зоны Главного хребта, рассматриваемой части Большого Кавказа, существенную роль в тектонической структуре играют южновергентные, так называемые, надвиги Скалистого хребта [Шевченко, 1984; Шевченко и др., 2017]. Они смещают отложения верхней юры и нижнего мела. В некоторых случаях под надвигами обнаруживаются верхнемеловые отложения. Это указывает на послемеловой возраст надвигов. Кроме того, известно, что надвиги Скалистого хребта смещают террасовые отложения и геоморфологические поверхности от четвертичных до миоценовых [Милановский, 1968].

Установлено, что южновергентный [Барковская и др., 1960] Владикавказский надвиг на границе Северного склона зоны Главного хребта и Бесланского прогиба Восточного Предкавказья деформирует террасовые отложения четвертичного возраста [Милановский, 1968] (рис. 11г).

Таким образом, в зоне Главного хребта и на его Северном склоне по структурно-геологическим данным зафиксированы южновергентные надвиговые смещения раннеюрского, среднеюрского, предпозднеюрского, позднеюрского–раннемелового, послемелового, четвертичного возраста. И северная, и южная границы зоны Главного хребта характеризуются наличием южновергентных взбросо-надвиговых позднекайнозойских нарушений. И в этом же направлении, судя по результатам геодезических измерений (выявляется в местной системе координат), происходят современные смещения GPS-пунктов зоны. Следовательно, результаты геологических наблюдений и геодезических измерений говорят о существовании единого геодинамического процесса в течение всего указанного временного интервала. Они согласованно свидетельствуют о том, что в течение последних ~200 с лишним млн лет, включая и настоящее время, в зоне Главного хребта происходят одни и те же процессы – происходят южновергентные смещения, формируются южновергентные надвиги и складки.

С точки зрения плейттектонической концепции перечисленные тектонические дислокации можно было бы рассматривать как поддвиговые и считать их следствием общего сжатия, сужения Большого Кавказа в результате сближения смежных литосферных плит. Но это неприменимо к результатам геодезических измерений современных латеральных смещений, поскольку при этих измерениях фиксируется

увеличение, а не уменьшение ширины зоны Главного хребта.

В северной части зоны Южного склона, на границе с зоной Главного хребта располагаются северовергентные Бурон-Ларские надвиги палеозойских пород и упоминавшихся ниже-среднеюрских «основных сланцев», а также группа сильно сжатых складок флишоидных пород верхней юры—мела. Имеющиеся геологические и геоморфологические данные позволяют считать, что смещения этих надвиговых пластин со стороны прогиба Южного склона в сторону зоны Главного хребта происходило в лейасе (в синемюре и плинсбах) и продолжилось в кайнозойе [Шевченко, 1984; Шевченко и др., 2017]. Соответственно геодезические пункты DZMG, EDIS, ERMN, KRES и ROOK на северном крыле Чиауро-Дибрарского синклиория, в полосе складок флишоидных пород верхней юры—мела в верховьях р. Б. Лиахва, также перемещаются в северном направлении (рис. 9).

В Гагра-Джавской зоне, в южной части зоны Южного склона, как уже упоминалось выше, таким же образом — из прогиба в сторону смежного поднятия Грузинской глыбы — ориентированы смещения чешуйчатых надвигов, наклоны и опрокидывания складок зоны. В то же время пункты ERTS, KHUR, KVYS и LESO в пределах этой последней также смещаются от того же прогиба Южного склона в южном направлении, в сторону поднятия Грузинской глыбы—Дзиркульского массива.

Следовательно, во всех перечисленных случаях направления смещения тектонических пластин и смещение GPS-пунктов совпадают.

Таким образом, выявляется тесная пространственная, кинематическая и, по-видимому, прямая генетическая связь между процессом формирования альпийской складчато-надвиговой тектонической структуры Большого Кавказа и современными смещениями элементов земной коры региона, выявляемыми по смещениям пунктов и станций GPS-измерений. Такое соответствие между ними указывает на то, что современные смещения элементов тектонической структуры региона — это продолжение геологического (мезозойского—кайнозойского) процесса формирования этих элементов структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные на рис. 1 результаты глобальных геодезических измерений подтверждают, с одной стороны, реальность существования

и взаимного перемещения, в том числе сближения, крупных литосферных плит — Евразийской и Аравийской в частности. С другой стороны, как показали региональные геодезические измерения (рис. 8, рис. 9), ширина, по крайней мере, изученных частей Большого Кавказа в настоящее время не уменьшается, а увеличивается. Но широко распространенные здесь надвиги — это дислокации, связанные с напряжениями субгоризонтального сжатия. Механизмы очагов землетрясений свидетельствуют о том, что обстановка субгоризонтального сжатия существует здесь и в настоящее время.

Представляется, что такое сочетание экспериментальных данных (увеличение ширины складчато-надвигового сооружения при одновременном существовании напряжений субгоризонтального сжатия, ориентированных вкрест простирания сооружения) может быть объяснено непротиворечиво только, если предположить, что современный тектогенез и сейсмичность Большого Кавказа связаны не со сближением плит, микроплит или блоков земной коры или литосферы, но с увеличением объема слоистых пород складчато-надвигового сооружения. При увеличении объема увеличивается, в том числе, площадь слоев. В результате они перестают уместиться на территории, которую занимали ранее, и дислоцируются. Возникают надвиги, покровы, складки. Слоистые породы, выполняющие прогибы, выталкиваются на смежные поднятия.

Причиной увеличения объема слоистых пород и последующего увеличения ширины сооружения, по-видимому, служит приток в них дополнительного минерального вещества восходящими потоками глубинных флюидов, глубинными гидротермами [Шевченко, 1984; Шевченко и др., 2017], обуславливающий возникновение напряжений распора, интерпретируемых обычно как напряжения субгоризонтального сжатия. Анализ геологических материалов по территории Большого Кавказа позволяет заключить, что этот вывод справедлив не только для времени, когда производятся геодезические измерения, но и для предыдущей, альпийской, истории этого сооружения. Таким образом, источник напряжений субгоризонтального сжатия Большого Кавказа необязательно связан с плитотектоническими механизмами, а, скорее, может иметь сугубо свой собственный, местный, автономный характер.

К аналогичному выводу на основе анализа полей тектонических напряжений региона пришел П.Н. Николаев: «*процессы, приводящие*

к деформациям и тектоническим движениям главных структурных элементов Кавказа, ... локализованы в их пределах» [Николаев П.Н. 1992, с. 136.] (выделение наше — А.Л., В.Ш.). П.Н. Николаев [1978] предполагает, что в пределах антиклинорных структур Кавказа, испытывающих современное воздымание, происходит разуплотнение вещества коры с выжиманием материала вверх.

Сходные представления о собственном потенциале латеральных перемещений блоков земной коры содержатся в одной из статей А.В. Пейве [1961], который связывает дифференцированный характер перемещения блоков земной коры с гравитационно-инерционными силами.

Представляется, что изложенные выше данные о строении, развитии и геодинамике Большого Кавказа не могут быть объяснены ни выжиманием материала коры вверх, ни действием гравитационно-инерционных сил. Но сама идея А.В. Пейве и П.Н. Николаева о приуроченности «движущей силы» тектонических движений и деформирования к самим элементам тектонической структуры, а не к внешним по отношению к ним воздействиям, представляется совершенно правильной.

Было предложено и иное объяснение расширения рассматриваемой, осетинской, части Большого Кавказа. Причиной этого явления могло бы быть то, что в осевой части мегантиклинория, по мнению ряда исследователей, на глубине располагается более легкий по сравнению с вмещающими объем земной коры. «Это тело можно интерпретировать как следствие глубинного диапиризма в понимании В.В. Белоусова» [Милюков и др., 2018, с. 291–292]. Предполагается, что этот объем оказывает «распирающее действие на все горное сооружение» [Милюков и др., 2018, с. 292], что, по-видимому, и приводит к расширению последнего.

Представление о глубинном диапире в осевой части Восточного Кавказа, сходного с «обычными поверхностными соляными или глинистыми диапирами», было высказано в работах ряда исследователей [Кириллова, 1962; Сорский, 1962; 1964; Шолпо, 1978; Шолпо и др., 1993]. В некоторых из перечисленных работ отмечается, что ядро диапира в процессе его роста оказывает боковое давление на окружающие его толщи, что приводит к формированию складчатости продольного изгиба в этих толщах.

Что касается «обычных поверхностных соляных или глинистых диапиров», имеющиеся данные [Ситтер, 1960] не дают никаких свидетельств в пользу существования такого бокового давления, бокового распора. Растущие, всплывающие

реальные диапиры задирают вверх слои прилегающих к ним пород. Но не сопровождаются образованием складок в этих породах.

Можно предположить, что эти данные относятся к «обычным» диапирам, а применительно к Большому Кавказу, в том числе к территории Осетии речь идет о «глубинных» диапирах. Представляется очевидным, что распирающее, расширение мегантиклинория должно сопровождаться дивергентными, в противоположных направлениях смещениями вмещающих диапир горных пород, от оси глубинного диапира к периферии вмещающей его структуры. Между тем результаты GPS-измерений на территории Осетии [Милюков и др., 2015; Шевченко и др., 1999; 2017] показали (в местной, локальной системе координат) прямо противоположную картину. Подавляющее большинство GPS-пунктов в зоне Главного хребта и его Северного склона в рассматриваемой части Большого Кавказа (BALK, DIGR, MATS, BUGT, ZAKK, ZRMG и станция LATZ) смещаются (с разбросом по азимутам) в южном направлении, т. е. в сторону осевой части мегантиклинория, а не от нее. А пункты, располагающиеся в северной части прогиба Южного склона (ROOK, DZMG, EDIS, ERMN, KRES) — в противоположном, северном направлении, т. е. тоже в сторону оси сооружения.

Таким образом, идея о распирающем действии глубинного диапира как причине увеличения ширины Большого Кавказа не представляется удачной. Кроме того, само существование всплывающего диапира кажется крайне сомнительным. Дело в том, что формирование любого диапира происходит (по определению) в результате вертикального, снизу вверх, перемещения материала горных пород. Но тектоническая структура Большого Кавказа, в том числе и его осетинской части, определяется перемещениями преимущественно пологих надвиговых тектонических пластин, что говорит об определяющей роли горизонтальных перемещений и напряжений в тектогенезе региона. Решения механизмов очагов землетрясений на территории Большого Кавказа согласуются с этим выводом (см. выше). Они позволяют распространять его, по крайней мере, на верхнюю половину земной коры рассматриваемой территории.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баженов М.Л., Буртман В.С.* Структурные дуги Альпийского пояса: Карпаты-Кавказ-Памир. М.: Наука. 1990. 167 с.
- Барковская К.С., Безбородов Р.С., Брод И.О. и др.* Геологическое строение восточной части северного склона Кавказа. Тр. Комплексной южной геологической экспедиции. Вып. 2. М.: Гостоптехиздат. 1960. 320 с.
- Буртман В.С.* Кинематика Аравийского синтаксиса // Геотектоника. 1989. № 2. С. 67–75.
- Варданыц Л.А.* Тектоническое строение Горной Осетии и ее отношение к Центральному Кавказу. Записки Рос. минералогич. об-ва. 1933. Сер. 2. Ч. 62. Вып. 1. С. 1–45.
- Варданыц Л.А.* Горная Осетия в системе Центрального Кавказа. Тр. ЦНИГРИ (ВСЕГЕИ). 1935. Вып. 25. 108 с.
- 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). г. Чолпон-Ата, Кыргызстан. 2016. С. 103–107.
- 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. Обнинск: ГС РАН. 2010. С. 59–64.
- Гамкрелидзе И.П.* Механизм формирования тектонических структур (на примере Аджаро-Триалетской зоны) и некоторые общие проблемы тектогенеза. Тр. Геол. ин-та АН Груз. ССР. Вып. 52. Тбилиси: Мецниереба. 1976. 225 с.
- Гамкрелидзе П.Д.* Геологическое строение Аджаро-Триалетской складчатой системы. Институт геологии и минералогии АН Груз. ССР. Тбилиси: изд-во АН Груз. ССР. 1949. Монографии. № 2. 508 с.
- Гамкрелидзе П.Д.* Тектоника. Геология СССР. 1964. Т. X. Ч. 1. М.: Недра. 656 с.
- Гамкрелидзе П.Д., Гамкрелидзе И.П.* Тектонические покровы Южного склона Большого Кавказа (в пределах Грузии). Тр. Геол. ин-та АН Груз. ССР. 1977. Нов. серия. Вып. 57. 82 с.
- Геология СССР. Северный Кавказ. Геологическое описание. 1968. Т. 9. М.: Недра. 759 с.
- Годзиковская А.А.* Мантийные землетрясения Кавказа в районе Терско-Сунженского прогиба // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1988. № 7. С. 102–106.
- Годзиковская А.А.* Глубокие землетрясения Кавказа. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Мат-лы 3-ей Международной школы Кисловодск, 20–24 октября 2008 г. Обнинск: изд-во Федеральный центр «Единая Геофизическая служба РАН». 2008. С. 34–40.
- Годзиковская А.А.* Еще раз о глубоких землетрясениях Кавказа // Вопросы инженерной сейсмологии. 2017. Т. 44. № 3. С. 41–56. DOI: 10.21455/VIS2017.3-3
- Гусева Т.В., Лукк А.А., Трапезников Ю.А., Шевченко В.И.* Геодинамика территории Гармского полигона (Таджикистан) по результатам светодальномерных наблюдений // Геотектоника. 1993. № 3. С. 47–54.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Моралев В.М.* Глобальная тектоника, магматизм и металлогения. М.: Недра. 1976. 232 с.
- Кириллова И.В.* Кливаж как показатель характера движения вещества в процессе развития складчатости. Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования. М.: изд-во АН СССР. 1962. С. 78–109.
- Копп М.Л.* Позднеальпийская коллизионная структура Кавказского региона. Большой Кавказ в альпийскую эпоху. М.: ГЕОС. 2007. С. 285–316.
- Кропоткин П.Н.* Соотношение поверхностной и глубинной структуры и общая характеристика движений земной коры. Строение и развитие земной коры. 1964. М.: Наука. С. 72–96.
- 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., Шевченко В.И.* Роль локальных процессов тектогенеза в деформировании слоистых пород Таджикской депрессии // Физика Земли. 2004. № 11. С. 5–25.
- Лукк А.А., Шевченко В.И.* Островные дуги, глубоководные желоба и сейсмофокальные зоны Индонезии и Тихого океана: сходство и различия // Физика Земли. 2008. № 2. С. 3–38.
- Маринин А.В., Расцветаев Л.М.* Структурные парагенезы Северо-Западного Кавказа. Проблемы тектонофизики. М.: ИФЗ РАН. 2008. С. 191–224.
- Милановский Е.Е.* Новейшая тектоника Кавказа. 1968. М.: Недра. 484 с.
- Милановский Е.Е., Хаин В.Е.* Геологическое строение Кавказа. 1963. М.: изд-во Моск. ун-та. 358 с.
- Милуков В.К., Миронов А.П., Стеблов Г.М., Шевченко В.И., Кусраев А.Г., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М.* Современные горизонтальные движения основных элементов тектонической структуры осетинской части Большого Кавказа по GPS измерениям // Физика Земли. 2015. № 4. С. 68–80.
- Милуков В.К., Миронов А.П., Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А., Горбатилов А.В., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М., Николаев А.В.* Скорости современных горизонтальных движений в центральном секторе Большого Кавказа (по данным GPS-наблюдений) и их связь с тектоникой и глубинным строением земной коры // Докл. РАН. 2018. Т. 481. № 3. С. 291–295.

- Никитин М.Ю., Никонов А.А., Болотов С.Н., Беляков Г.А.* Палеосейсмодислокации в бассейне р. Ардон и их значение для оценки сейсмического потенциала Большого Кавказа // Докл. РАН. 1993. Т. 330. № 6. С. 740–744.
- Николаев П.Н.* Напряженное состояние и механизм деформаций земной коры Альпийской складчатой области // Изв. ВУЗ. Геология и разведка. 1978. № 11. С. 65–78.
- Николаев П.Н.* Методика тектоно-динамического анализа. 1992. М.: Недра. 296 с.
- Новая глобальная тектоника (тектоника плит). М.: МИР. 1974. 472 с.
- Панов Д.И.* Этапы геологического развития Кавказо-Иранского сегмента Средиземноморского подвижного пояса в мезозое и кайнозое // Бюл. МОИП, отд. геол. 2013. Вып. 4. С. 74–86.
- Панов Д.И., Ломизе М.Г.* Ранняя и средняя юра Большого Кавказа (стратиграфия и тектоника, вулканизм и геодинамическая эволюция). Большой Кавказ в альпийскую эпоху. М.: ГЕОС. 2007. С. 39–110.
- Пейве А.В.* Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1961. № 3. С. 36–54.
- Прилепин М.Т., Баласанян С., Баранова С.М., Гусева Т.В., Мишин А.В., Надария М., Рогожин Е.А., Розенберг Н.К., Сквородкин Ю.П., Хамбургер М., Кинг Р., Рейлингер Р.* Изучение кинематики Кавказского региона с использованием GPS технологии // Физика Земли. 1997. № 6. С. 68–75.
- Расцветаев Л.М., Курдин Н.Н., Маринин А.В., Тверитинова Т.Ю.* Тектоническое течение горных масс в альпийской структуре Большого Кавказа. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. 2012. Т. 1. М.: ИФЗ РАН. С. 421–426.
- Резанов И.А., Шевченко В.И.* Строение и эволюция земной коры геосинклинали. М.: Недра. 1978. 183 с.
- Ренгартен В.П.* Геологический очерк района Военно-Грузинской дороги. Тр. Всесоюз. геол.-разв. объединение. 1932. Вып. 148. 80 с.
- Рогожин Е.А.* Барисахское землетрясение 1992 г. на южном склоне Большого Кавказа: тектоническая позиция очага. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М.: ИФЗ РАН. 1993. С. 148–151.
- Сорский А.А.* Об условиях формирования полной складчатости в осевой зоне Восточного Кавказа. Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования. М.: изд-во АН СССР. 1962. С. 9–41.
- Сорский А.А.* Типы геосинклинальной складчатости Кавказа и условия их формирования. Складчатые области Евразии. М.: Наука. 1964. С. 303–317.
- Трифонов В.Г.* Коллизия и горообразование // Геотектоника. 2016. № 1. С. 3–24.
- Трифонов В.Г., Соколов С.Ю.* На пути к постплейт-тектонике // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 7. С. 605–615.
- Хаин В.Е.* Региональная геотектоника. Альпийский Средиземноморский пояс. М.: Недра. 1984. 344 с.
- Хаин В.Е.* Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Научный мир. 2001. 606 с.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. Изд-во Моск. ун-та. 1995. 480 с.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики (3-е изд.). М.: Университет. Книжный дом. 2010. 560 с.
- Шатский Н.С.* О надвигах восточной части Черных гор на Северном Кавказе // Бюл. МОИП, отд. геол. 1925. Т. 3. № 3–4. С. 305–344.
- Шатский Н.С.* Заметки о тектонике третичных предгорий северо-восточного Кавказа // Бюл. МОИП, отд. геол. 1927. Т. 5. № 3–4. С. 321–369.
- Шатский Н.С.* Геологическое строение восточной части Черных гор и нефтяных месторождений Миатлы и Дылым (Северный Дагестан). Тр. Гос. научно-исслед. нефт. ин-та, сер. А. 1929. Вып. 4. С. 31–95.
- Шевченко В.И.* Соотношение структуры древних и юрских толщ Центрального Кавказа на примере Зылгинского массива // Геотектоника. 1971. № 2. С. 70–78.
- Шевченко В.И.* О природе Ханикомской антиклинали на р. Фиагдон (Северный Кавказ) // Изв. ВУЗ. Геология и разведка. 1972. № 11. С. 133–134.
- Шевченко В.И.* Происхождение структур горизонтального сжатия в складчатом сооружении (на примере Большого Кавказа). М.: Наука. 1984. 160 с.
- Шевченко В.И.* Средиземноморье–Кавказ: плейттектоническая и геосинклинальная концепции // Бюл. МОИП, отд. геол. 2005. Вып. 4. С. 21–29.
- Шевченко В.И., Лукк А.А., Гусева Т.В.* Геология, геодезия, сейсмичность Большого Бассейна (Провинция Бассейнов и Хребтов, США) // Физика Земли. 1996. № 9. С. 3–27.
- Шевченко В.И., Гусева Т.В., Лукк А.А., Мишин А.В., Прилепин М.Т., Рейлинджер Р.Э., Хамбургер М.У., Шемпелев А.Г., Юнга С.Л.* Современная геодинамика Кавказа (по результатам GPS измерений и сейсмическим данным) // Физика Земли. 1999. № 9. С. 3–18.
- Шевченко В.И., Лукк А.А., Прилепин М.Т.* Геодинамика района Эгейского моря и его горного обрамления в Средиземноморском подвижном поясе // Физика Земли. 2000. № 10. С. 29–47.
- Шевченко В.И., Лукк А.А.* Сейсмотомографические «зоны субдукции» в мантии эгейско-тирренского сектора Средиземноморского подвижного пояса // Физика Земли. 2002а. № 6. С. 71–81.
- Шевченко В.И., Лукк А.А., Прилепин М.Т.* Геодинамика альборанского сектора Средиземноморского подвижного пояса // Докл. РАН. 2002б. Т. 386. № 6. С. 802–804.
- Шевченко В.И., Лукк А.А., Прилепин М.Т.* Суматранское землетрясение 26.12.2004 г. – проявление неплейттектонического процесса в литосфере // Физика Земли. 2006. № 12. С. 55–76.
- Шевченко В.И., Гусева Т.В., Лукк А.А., Прилепин М.Т.* Урал-плейттектоническая или автономная геодинамика? // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2011. Вып. 3. С. 11–20.

Шевченко В.И., Гусева Т.В., Лукк А.А., Прилепин М.Т., Стеблов Г.М., Милоков В.К., Миронов А.П., Кусраев А.Г., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М. Неплейттектоническая GPS-геодинамика Большого Кавказа. Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ. М-лы XLVIII Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС. 2016. С. 295–299.

Шевченко В.И., Лукк А.А., Прилепин М.Т., Рейлинджер Р.Е. Современная геодинамика Средиземноморской-Малокавказской части Альпийско-Индонезийского подвижного пояса // Физика Земли. 2014. № 1. С. 40–58.

Шевченко В.И., Лукк А.А., Гусева Т.В. Автономная и плейттектоническая геодинамики некоторых подвижных поясов и сооружений. М.: ГЕОС. 2017. 612 с.

Шевченко В.И., Гусева Т.В., Добровольский И.П., Крупеникова И.С., Лукк А.А. Автономная (неплейттектоническая) геодинамика Пиренеев // Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 17. № 1. С. 77–108.

Шолто В.Н. Альпийская геодинамика Большого Кавказа. М.: Недра. 1978. 176 с.

Шолто В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А. Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука. 1993. 192 с.

Яковлев Ф.Л. О построении рельефа поверхности раздела чехол–фундамент Большого Кавказа на основе определения величин сокращения складчатых структур.

Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли. Материалы 39-го тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС. 2006. С. 411–415.

Heflin M. et al., 2004. <http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html>

McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., Kastens K., Kekelidze G., King R., Kotzev V., Lenk O., Mahmoud S., Mishin A., Nadariya M., Ouzounis A., Paradissis D., Peter Y., Prilepin M., Reilinger R., Sanli I., Seeger H., Tealeb A., Toksoz M.N., Veis G. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus // Journal of Geophysical Research. 2000. V. 105. P. 5695–5719. doi: 10.1029/1999 JB900351

Reilinger R., McClusky S., Souter B., Hamburger M., Prilepin M., Mishin A., Guseva T., Balassanian S. Preliminary estimates of plate convergence in the Caucasus collision zone from global positioning system measurements // Geoph. Res. Letters. 1997. M. 24. № 14. P. 1815–1818.

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. 2006. V. 409. P. 531–578. doi: 10.1130/2006.2409 (25)

Seismicity, Tectonics, and GPS Geodynamics of the Caucasus

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

^aSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia

*E-mail: lukk@ifz.ru

**E-mail: shevch@ifz.ru

Received August 6, 2018

The style of the seismotectonic deformation of the Earth's crust in the Caucasus and its immediate surroundings corresponds to the thrust setting with a subhorizontal principal compression axis oriented north-northeast across the strike of the Caucasian structures and a subvertical principal extension axis, as established by the reconstruction of a representative set of focal mechanisms of earthquakes. Overall, this deformation style quite closely agrees with the notions developed in plate tectonics according to which the Caucasian segment of the Alpine–Indonesian mobile belt is experiencing strong transversal (across the strike) narrowing as a result of the convergence of the Arabian and Eurasian lithospheric plates. At the same time, the detailed geodetic measurements conducted in the territory of the Greater Caucasus established the GPS site displacements, testifying to the increase of its width. This widening cannot be attributed to the extension across the strike of this mountainous edifice because the focal mechanism solutions of earthquakes in this territory clearly indicate a setting of compressive stresses across the strike of the geological structures. We suggested interpreting this combination of the geodetic and seismological data by the active growth of the volume (and area) of layered rocks of the Greater Caucasus and the emergence of the setting of outward pressure probably as a result of the inflow of the additional mineral material carried by the ascending deep fluids.

Keywords: the Caucasus, seismicity, focal mechanisms, GPS measurements, geological dislocations, rock volume