

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ВЛАДИКАВКАЗСКОЙ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В.К. Милюков¹, В.Н. Дробышев²,
А.П. Миронов³, А.Н. Овсяченко⁴, Х.М. Хубаев⁵

Аннотация. В рамках плана научно-исследовательских работ ВНЦ РАН и РСО-А и проекта РФФИ по изучению современной геодинамики и глубинного строения зоны Владикавказского разлома для проведения периодически-повторных наблюдений мобильной ГНСС-аппаратурой в 2014–2015 году была создана спутниково-геодезическая сеть, состоящая из 23 полевых пунктов. В 2014–2016 годах на пунктах были проведены наблюдения, на основании которых были получены оценки скоростей в общеземной системе отсчета. В работе приводятся результаты этих исследований.

Ключевые слова: спутниковая геодезия, ГНСС-наблюдения, современные движения земной коры.

ВЛАДИКАВКАЗСКАЯ СПУТНИКОВО- ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ СЕТЬ

Для изучения современных движений земной коры в тектонически активных районах наиболее эффективными являются методы космической геодезии, основанные на ГНСС-наблюдениях (глобальные навигационные спутниковые системы). В рамках программы по изучению современной геодинамики и глубинного строения сочленения Большого Кавказа и Осетинской предгорной впадины в 2014–2015 гг. в зоне Владикавказской разломной структуры была создана спутниково-геодезическая сеть. Владикавказский глубинный разлом представляет собой сложную тектоническую структуру. С геологической точки зрения можно выделить три основных ветви. Северная ветвь разломной зоны представляет собой взброс, по которому Большой Кавказ взброшен на прилегающую Осетинскую впадину. Средняя и южная ветви демонстрируют опускание южного, нагорного крыла [1]. Структурно спутниково-геодезическая сеть состоит из 4 профилей, пересекающих все три ветви разлома вдоль долин рек Ардон, Фиагдон, Гизельдон и Терек (рис. 1). Профили закладывались с учетом наблюдения деформаций как по разломной зоне в целом, так и по отдельным ветвям. Краевые пункты профилей были выбраны за пределами влияния разлома, с целью исключить в наблюдениях проявление локальных внутри-разломных деформаций. Геодезические пункты для проведения ГНСС-наблюдений установлены на поверхности высоких надпойменных террас,

в условиях, исключающих развитие склоновых процессов.

С учетом геологической обстановки в 2014 г. были созданы пункты по профилям рек Фиагдон (пункты FRSV, FDZF, FDZZ, FTGR) и Гизельдон (GGZZ, GVSS, GVSO, GAVT). Пункты оснащены геодезическими маркерами, вмурованными в скальную породу, что обеспечивает принудительное центрирование антенны и позволяет проводить многократные измерения на пункте без предварительных юстировочных работ [2, 5]. Такая система закладки геодезических меток считается в мировой практике общепринятой для полевой высокоточной GPS-съемки. Геодезические маркеры изготовлены по образцам, используемым в европейских спутниково-геодезических сетях. Маркеры устанавливались в стабильные основания с массивным фундаментом. В 2014 году на созданных геодезических пунктах были проведены первые ГНСС-измерения [2]. В 2015 г. на этих пунктах были проведены повторные измерения.

Также в 2015 г. были проведены геологические изыскания и созданы новые пункты по профилям рек Ардон (пункты ARMN, ATSC, ANBK, AVBC, AVBM, ATAM), Терек (пункты TNGP, TNGM, TVLG, TVLM, TRDN, TBLT) и три пункта (DJMR, KANI, LARS) в предгорье, южнее Владикавказской разломной зоны. На новых пунктах в 2015 году были проведены первые измерения, а в 2016 году были проведены повторные измерения на всех пунктах Владикавказской геодезической сети. Измерения на всех пунктах проводятся двухчастотными приемниками Javad

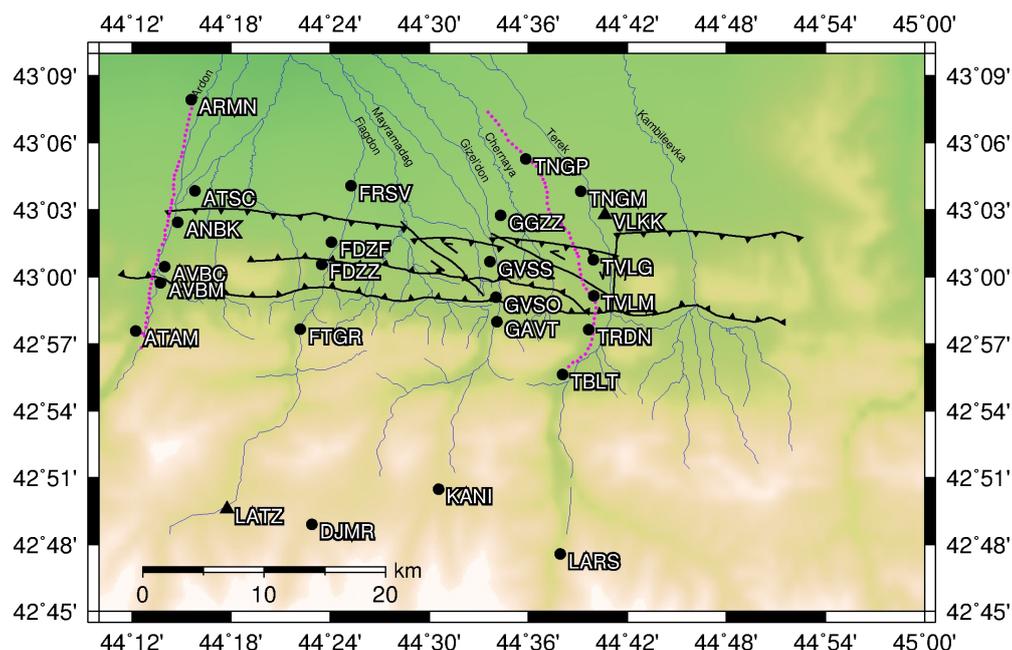
¹ Милюков Вадим Константинович – д. ф.-м. н., Владикавказский научный центр РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга (milyukov@sai.msu.ru).

² Дробышев Валерий Николаевич – сотрудник Владикавказского научного центра РАН.

³ Миронов Алексей Павлович – м. н. с., МГУ им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга.

⁴ Овсяченко Александр Николаевич – к. г.-м. н., ст. н. с., Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

⁵ Хубаев Харитон Майорович – сотрудник Владикавказского научного центра РАН.



2016 Sep 24 11:45:34 Alexey Mironov <miron@sa.i.msu.ru>

Рис. 1. Карта положения ветвей Владикавказской разломной зоны, пунктов (кружки) и станций (треугольники) Владикавказской спутниково-геодезической сети. Пунктиром обозначены профили сейсмического зондирования, выполненные в 2010 г. [1]

Таблица 1

Периодически-повторные измерения на пунктах спутниково-геодезической сети Владикавказского разлома в 2014–2016 гг.

код	2014			2015			2016		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ANBK				14.июн	17.июн	4	17.июн	19.июн	3
ARMN				19.июн	25.июн	7	21.июн	23.июн	3
ATAM				19.июн	24.июн	6	21.июн	23.июн	3
ATSC				14.июн	16.июн	3	17.июн	19.июн	3
AVBC				09.июн	12.июн	4	13.июн	15.июн	3
AVBM				09.июн	12.июн	4	13.июн	15.июн	3
FDZF	19.июл	21.июл	3	21.июл	23.июл	3	20.июл	23.июл	4
FDZZ	23.июл	26.июл	4	27.окт	29.окт	3	25.июл	28.июл	4
FRSV	19.июл	19.июл	1	21.июл	23.июл	3	20.июл	23.июл	4
FTGR	21.авг	25.авг	5	21.авг	25.авг	5	22.авг	25.авг	4
				31.авг	02.сен	3			
				27.окт	29.окт	3			
GAVT	28.июл	30.июл	3	29.июл	29.июл	1	14.авг	14.авг	1
				31.авг	02.сен	3			
GGZZ	28.июл	30.июл	3	29.июл	02.авг	5	30.июл	05.авг	7
GVSO	07.сен	08.сен	2	08.сен	11.сен	4	05.сен	09.сен	5
GVSS	07.сен	08.сен	2	08.сен	11.сен	4	05.сен	12.сен	8
TBLT				26.май	02.июн	8	26.май	02.июн	8
TNGM				04.июн	07.июн	4	09.июн	11.июн	3
TNGP				04.июн	05.июн	2	04.июн	07.июн	4
TRDN				21.май	24.май	4	21.май	24.май	4
TVLG				28.май	01.июн	5	26.май	31.май	5
TVLM				21.май	22.май	2	21.май	24.май	4
DJMR				15.июл	18.июл	4	15.июл	18.июл	4
KANI				15.июл	17.июл	3	15.июл	18.июл	4
LARS				09.июл	13.июл	5	09.июл	13.июл	5

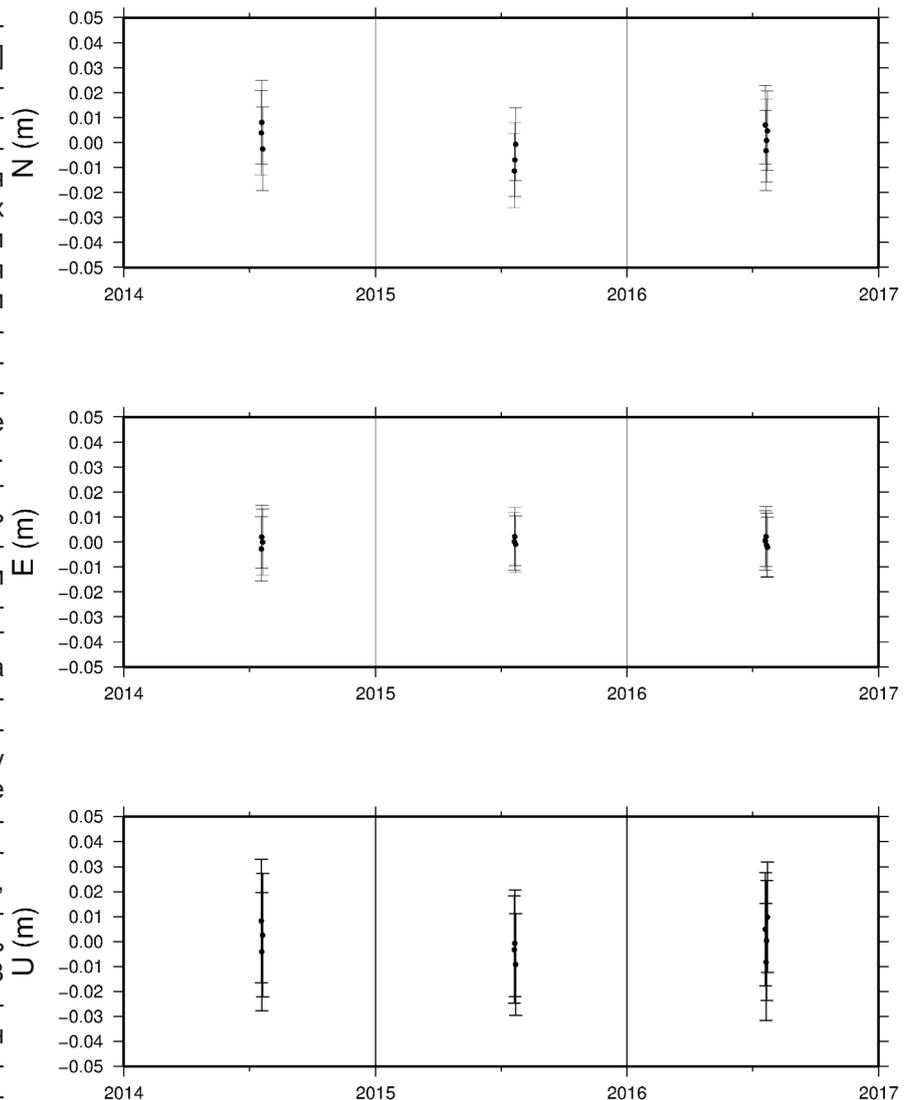
Указаны целые наблюдаемые сутки по UTC+0, использованные в обработке. Внутри года: 1 – первые сутки, 2 – последние сутки, 3 – длительность измерений за сессию

Lexon-GGD112T (L1/L2 GPS/GLONASS) [3] с антеннами Javad MarAnt+ [4].

В отличие от станций непрерывных наблюдений [6] измерения на пунктах проводятся периодически-повторно, сессиями. Для каждого пункта учитываются длительность непрерывных измерений в каждой сессии и периодичность проведения измерений. Необходимым условием измерений является непрерывное время наблюдения за одну сессию, которое должно быть не менее 3 суток по времени UTC+0. Такая длительность наблюдений позволяет разрешить целочисленные неоднозначности фазовых измерений и добиться точности определения приращения координат порядка одного сантиметра за сутки. Для большинства пунктов периодичность проведения измерений кратна одному году. В этом случае влияние сезонных вариаций в смещении пунктов будет минимальным. В редких случаях, обычно в связи с отказом оборудования, периодичность измерений нарушалась. В целом, в 2014–2016 гг. на профилях Фиагдон и Гизельдон проведены три сессии периодически-повторных измерений и две по профилям Ардон и Терек. Время наблюдения на пунктах приведено в таблице 1.

Таким образом, в настоящее время Владикавказская геодезическая сеть состоит из 23 пунктов для проведения периодически-повторных измерений мобильной ГНСС-аппаратурой. В сеть также включены две станции непрерывных спутниковых измерений [7]: во Владикавказе (VLKK), работающая с 2008 г., и в селе Лац (LATZ), работающая с 2011 г. (рис. 1). Решение совокупных геодезических наблюдений на полевых пунктах и близко расположенных стационарных станциях позволяет получить детальную оценку геодезической обстановки исследуемого региона.

FDZF



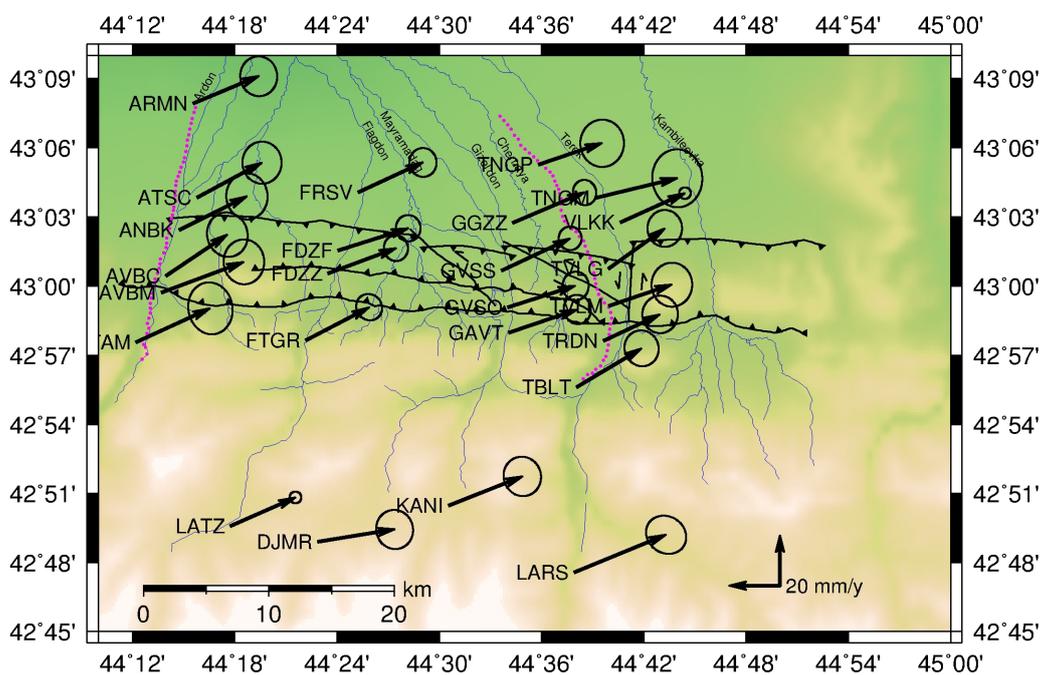
2016 Sep 24 00:24:38 Alexey Mironov <miro@sai.msu.ru>

Рис. 2. Вычисленные вариации координат пункта FDZF по суточным измерениям для сессий 2014–2016 гг. (значения координаты отмечены точками, погрешности – вертикальными линиями). N, E, U – северная, восточная и вертикальная составляющие в метрах. На графиках удален линейный тренд

Для обработки ГНСС-данных используется пакет программ GAMIT/GLOBK, предназначенный для высокоточных геодезических определений по радионавигационным спутниковым измерениям [8]. Обработка выполнялась на комплексе хранения и обработки астрономических данных ГАИШ МГУ, созданном в рамках Программы развития Московского университета. Стратегия обработки заключается в комбинировании опорных и определяемых ГНСС станций. В качестве опорных использовались 40 станций

Таблица 2
Погрешности определения координат пункта FDZF за сутки (σ_N , σ_E , σ_Z) и суммарная погрешность за измерительную сессию по измерениям 2014–2016 гг. ($\sigma_{\bar{N}}$, $\sigma_{\bar{E}}$, $\sigma_{\bar{Z}}$)

Дата	σ_N (см)	$\sigma_{\bar{N}}$ (см)	σ_E (см)	$\sigma_{\bar{E}}$ (см)	σ_Z (см)	$\sigma_{\bar{Z}}$ (см)
19.07.2014	1.691	1.681	1.290	1.291	2.479	2.441
20.07.2014	1.672		1.258		2.376	
21.07.2014	1.679		1.323		2.466	
21.07.2015	1.486	1.478	1.159	1.156	2.152	2.110
22.07.2015	1.485		1.170		2.131	
23.07.2015	1.462		1.140		2.044	
20.07.2016	1.576	1.609	1.192	1.215	2.265	2.304
21.07.2016	1.604		1.203		2.340	
22.07.2016	1.660		1.265		2.391	
23.07.2016	1.594		1.199		2.214	



2016 Sep 24 12:08:54 Alexey Mironov <miro@sai.msu.ru>

Рис. 3. Векторы GPS-скоростей горизонтальных смещений станций и пунктов Владикавказской геодезической сети относительно системы ITRF2008 и эллипсы ошибок 1- σ

сети IGS (International GNSS Service) [9], покрывающих земную полусферу с центром в регионе исследования. В дополнение к станциям IGS в обработку были добавлены станции непрерывных ГНСС-наблюдений, работающие в регионе [6, 7], что позволило существенно повысить сходимость результатов и в конечном итоге увеличить точность оценок скоростей смещения пунктов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате обработки наблюдений были получены ряды приращений координат для всех пунктов и станций Владикавказской геодезической сети. В качестве примера на *рис. 2* приведены вычисленные вариации трех координат для пункта FDZF (двух горизонтальных, *N* и *E*,

и вертикальной *Z*), вычисленных по измерениям 2014–2016 гг. В *таблице 2* приведены погрешности определения координат пункта FDZF за сутки и суммарная погрешность за измерительные сессии 2014–2016 гг. Суммарная погрешность для широтной компоненты *E* варьируется в пределах 1.1–1.3 мм, для меридиональной *N* – 1.4–1.7 мм и для вертикальной компоненты *Z* – 2.1–2.4 мм.

По рядам приращений координат с помощью регрессионного анализа была получена оценка скоростей смещения пунктов Владикавказской геодезической сети относительно общеземной системы координат ITRF2008. Результаты представлены в *табл. 3* и на *рис. 3*. В данной системе смещения геодезических пунктов в горизонтальной плоскости характеризуются устойчивой

Таблица 3

Широтные V_e , меридиональные V_n компоненты и полные вектора скоростей (V) горизонтальных смещений полевых пунктов и станций Владикавказской геодезической сети с ошибками их определений в системе координат ITRF2008 по измерениям 2014–2016 гг.

код	V_e (мм/год)	V_n (мм/год)	V (мм/год)	азимут	Кол-во сессий
Профиль Ардон					
ANBK	26.34±3.30	13.25±3.71	29.48±3.51	63.30	2
ARMN	25.57±2.95	10.79±3.20	27.75±3.08	67.12	2
ATAM	28.92±3.55	13.37±4.18	31.86±3.88	65.19	2
ATSC	25.32±3.13	13.78±3.39	28.83±3.26	61.44	2
AVBC	23.99±3.25	16.26±3.57	28.98±3.41	55.87	2
AVBM	32.10±3.24	12.04±3.61	34.28±3.43	69.44	2
Профиль Фиагдон					
FDZF	27.40±1.97	8.74±2.12	28.76±2.05	72.31	3
FDZZ	26.60±1.93	9.93±2.07	28.39±2.00	69.53	3
FRSV	25.29±2.17	11.82±2.32	27.92±2.25	64.95	3
FTGR	24.72±2.07	12.98±2.12	27.92±2.10	62.30	3
Профиль Гизельдон					
GAVT	26.68±2.17	9.08±2.35	28.18±2.26	71.21	3
GGZZ	28.06±1.87	12.02±2.03	30.53±1.95	66.81	3
GVSO	26.38±2.09	8.53±2.30	27.72±2.20	72.08	3
GVSS	26.69±1.83	12.63±1.90	29.53±1.87	64.68	3
Профиль Терек					
TBLT	25.37±2.73	15.26±2.88	29.61±2.81	58.97	2
TNGM	32.00±4.00	7.79±4.67	32.93±4.35	76.32	2
TNGP	24.74±3.49	8.47±3.81	26.15±3.65	71.10	2
TRDN	22.02±2.84	10.41±3.02	24.36±2.93	64.70	2
TVLG	21.91±2.76	15.80±2.97	27.01±2.87	54.20	2
TVLM	24.50±3.25	8.39±3.54	25.90±3.40	71.10	2
Предгорье					
DJMR	30.03±2.95	4.92±3.15	30.43±3.05	80.70	2
KANI	28.79±3.00	11.46±3.17	30.99±3.09	68.29	2
LARS	35.82±3.21	14.83±3.07	38.77±3.14	67.51	2
Станции непрерывных наблюдений					
LATZ	25.49±0.94	11.29±0.94	27.88±0.94	66.11	2011-по н. время
VLKK	25.22±0.93	11.50±0.93	27.72±0.93	65.49	2008- по н. время

северо-восточной направленностью с достаточно большими скоростями, 27–30 мм/год, что в целом совпадает с оценкой скоростей современных движений по наблюдениям как на стационарных ГНСС-станциях Осетинского региона LATZ и VLKK, так и всего Северного Кавказа [6, 7]. Таким образом, полученные оценки скоростей пунктов Владикавказской геодезической сети относительно системы ITRF2008 характеризуют общее движение Владикавказской разломной зоны в составе всего северокавказского региона.

Для того чтобы выявить локальные движения отдельных частей Владикавказского разлома, необходимо получить оценку скоростей относительно других систем отсчета: относительно неподвижной Евразии, или региональной системы, определяемой региональными станциями непрерывных наблюдений. Естественно, что в таких системах отсчета величина скоростей смещений будет существенно меньше, чем в ITRF2008. Поэтому при одних и тех же погрешностях определения скоростей достоверность оценки в региональных системах отсчета будет меньше, чем в ITRF2008. Характерная величина погрешности определения скорости для постоянных станций VLKK и LATZ порядка 1 мм/год, что характерно и для большинства станций IGS. Для пунктов профилей Фиагдон и Гизельдон оценка скоростей выполнена по трем сессиям измерений, и средняя погрешность определения скорости порядка 2.0–2.1 мм/год. Для пунктов профилей Ардон и Терек оценки выполнены по двум сессиям измерений, средняя погрешность определения скорости порядка 3.3–3.4 мм/год, т. е. в полтора раза хуже, чем в первом случае. Накопление повторных измерений приведет к тому, что погрешность оценки скоростей достигнет величины 1–1.5 мм/

год. Это позволит выполнить детальный анализ поля скоростей современных движений, определить пространственное распределение деформаций коры и оценить геодинамическую обстановку в зоне Владикавказского разлома.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные геолого-геофизические исследования, проведенные в зоне Владикавказского разлома, позволяют отнести его к структурам с высоким сейсмическим потенциалом [1, 10]. В этой связи геодинамический мониторинг этой опасной зоны современными средствами ГНСС является не только интересной научной задачей, но и актуальной с точки зрения прогноза ее возможной потенциальной активности. Для проведения геодинамического мониторинга Владикавказского глубинного разлома в 2014–2015 гг. была создана спутниково-геодезическая сеть, состоящая из 23 полевых пунктов и двух стационарных станций, пересекающая основные ветви разлома по четырем профилям, и начаты регулярные наблюдения. Результаты наблюдений 2014–2016 годов позволили получить первые оценки скоростей смещений пунктов относительно системы координат ITRF2008. Полученные оценки скоростей 27–30 мм/год характеризуют общее движение Владикавказской разломной зоны в составе всего северокавказского региона. Вместе с тем, проведенные три сессии наблюдений не дают возможности достоверно оценить взаимные движения отдельных частей Владикавказского разлома, поскольку локальные движения имеют величину на порядок меньше общего движения. Такая задача будет решена при накоплении измерений в течение последующих 2–3 лет.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-45-01005 с использованием оборудования ВЦ РАН и Московского университета (приобретенного за счет средств Программы развития МГУ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Овсяченко А.Н., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Ларин Н.В., Рогожин Е.А. Сейсмотектоника и глубинное строение зоны Владикавказского активного разлома // Геофизические исследования, 2011, том 12, № 1, с. 47–59.
2. Милюков В.К., Дробышев В.Н., Миронов А.П., Овсяченко А.Н., Хубаев Х.М. Создание высокоточной геодезической сети для изучения современных движений Владикавказской разломной зоны с использованием GPS-технологий // Вестник Владикавказского научного центра, 2014, том 14, № 4, с. 25–29.
3. <http://www.javad.com/jns/index.html?/jns/products/LexonGGD112T.html>
4. <http://www.javad.com/jns/index.html?/jns/products/MarAntPlus.html>
5. Милюков В.К., Дробышев В.Н., Миронов А.П., Стеблов Г.М., Хубаев Х.М. Осетинская геодезическая спутниковая сеть: создание и первые результаты геодинамического мониторинга // Вестник Владикавказского научного центра, 2014, том 14, № 4, с. 2–11.
6. Милюков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям // Геотектоника, 2015, № 3, с. 56–65.
7. Милюков В.К., Вольфман Ю.М., Горбатиков А.В., Миронов А.П., Пустовитенко Б.Г., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. Современные тектонические движения Северного Кавказа и Крыма по GPS-наблюдениям: сравнительный анализ // В сборнике: Десятая международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных», 14–18 сентября 2015 г. Новоханы, Азербайджан, 2015. С. 217–220.

8. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. 2010.

9. <http://www.igs.org/>

10. Рогожин Е.А. Очерки региональной сейсмотектоники // отв. ред. А.О. Глико. – М.: ИФЗ РАН, 2012. 340 с.

CONTEMPORARY MOVEMENTS OF THE VLADIKAVKAZ FAULT ZONE: THE FIRST RESULTS

Milyukov V.K.^{1,2}, Drobyshev V.N.¹, Mironov A.P.²,
Ovsyuchenko A.N.³, Hubaev H.M.¹

¹ Vladikavkaz Scientific Center of Russian Academy of Science, Vladikavkaz, Russia.

² Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia, (milyukov@sai.msu.ru).

³ Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Science. Moscow, Russia.

Abstract. In 2014–2015 under the plans of research works of VSC of RAS&RNO-Alania Government and the project of the RFBR on studying of modern geodynamics and a deep structure of the Vladikavkaz Fault Zone the satellite geodetic network for repeated periodic observation by the GNSS mobile equipment has been created. This network consists of 23 survey-mode stations. In 2014–2016 the GPS – observations have been performed and velocities of survey-mode stations relative to the International Terrestrial Reference Frame (ITRF2008) have been estimated. Results of this research are presented in the paper.

Keywords: satellite geodesy, GNSS observations, contemporary movements of the earth crust.

REFERENCES

1. Ovsyuchenko A.N., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Larin N.V., Rogozhin E.A. Seysmotektonika i glubinnoe stroenie zony Vladikavkazskogo aktivnogo razloma // Geofizicheskie issledovaniya, 2011, tom 12, № 1, s. 47–59.
2. Milyukov V.K., Drobyshev V.N., Mironov A.P., Ovsyuchenko A.N., Khubaev Kh.M. Sozdanie vysokotochnoy geodezicheskoy seti dlya izucheniya sovremennykh dvizheniy vladikavkazskoy razlomnoy zony s ispol'zovaniem GPS-tehnologiy // Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra, 2014, tom 14, № 4, s. 25–29.
3. <http://www.javad.com/jns/index.html?jns/products/Lexon-GGD112T.html>
4. http://www.javad.com/jns/index.html?jns/products/MarAnt_Plus.html
5. Milyukov V.K., Drobyshev V.N., Mironov A.P., Steblou G.M., Khubaev Kh.M. Osetinskaya geodezicheskaya sputnikovaya set': sozdanie i pervye rezultaty geodinamicheskogo monitoringa // Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra, 2014, tom 14, № 4, s. 2–11.
6. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblou G.M. Otsenki skorostey sovremennykh dvizheniy Severnogo Kavkaza po GPS nablyudeniya // Geotektonika, 2015, № 3, s. 56–65.
7. Milyukov V.K., Vol'fman Yu.M., Gorbatikov A.V., Mironov A.P., Pustovitenko B.G., Rogozhin E.A., Steblou G.M. Sovremennye tektonicheskie dvizheniya Severnogo Kavkaza i Kryma po GPS nablyudeniya: sravnitel'nyy analiz // V sbornike: Desyataya mezhdunarodnaya seismologicheskaya shkola «Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh», 14–18 sentyabrya 2015 g. Novkhany, Azerbaydzhan, 2015. S. 217–220.
8. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. 2010.
9. <http://www.igs.org/>
10. Rogozhin E.A. Ocherki regional'noy seysmotektoniki // отв. ред. А.О. Глико. – М.: ИФЗ РАН, 2012. 340 с

