

## ОСЕТИНСКАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ СПУТНИКОВАЯ СЕТЬ: СОЗДАНИЕ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В.К. Миллюков<sup>1</sup>, В.Н. Дробышев<sup>2</sup>, А.П. Миронов<sup>3</sup>,  
Г.М. Стеблов<sup>4</sup>, Х.М. Хубаев<sup>5</sup>

**Аннотация.** Осетинская часть Большого Кавказа, будучи одним из самых тектонически активных регионов Кавказа, до последнего времени не была охвачена высокоточными геодезическими измерениями, основанными на спутниковых методах. Начиная с 2010 г. авторами данной работы в этом регионе была создана сеть геодезических пунктов для проведения периодически-повторных измерений мобильной GPS-аппаратурой, а также установлены три стационарные GPS-станции. В работе приводятся методика обработки и результаты GPS-измерений 2010–2013 гг. Оценки скоростей горизонтальных смещений приведены в трех системах отсчета: в общеземной системе координат ITRF2008, относительно неподвижной Евразии и в локальной системе отсчета, определенной стационарной станцией ARDN. Полученные результаты, помимо общего субмеридионального движения региона, связанного с конвергенцией Евразийской и Аравийской плит, выявили ряд тектонических особенностей, обусловленных, по-видимому, продолжающимися локальными процессами формирования тектонической структуры этого региона.

**Ключевые слова:** спутниковая геодезия, GPS-измерения, современные движения земной коры, региональные тектонические процессы.

### ВВЕДЕНИЕ

Большой Кавказ в целом и осетинский регион в частности – это сложный с точки зрения тектонической структуры регион, который рассматривается в рамках плейттектонической концепции как результат взаимодействия двух крупных литосферных плит – Евразийской и Аравийской. Считается, что сближение этих плит формирует современную геодинамику региона, которая характеризуется продолжающимся образованием складчато-надвиговой структуры, сложной системой разломов, вулканизмом, повышенной сейсмичностью, активными движениями земной коры. Вне зависимости от того или иного подхода к интерпретации тектонической структуры Большого Кавказа не вызывает сомнения то, что формирование этой структуры связано, в первую очередь, с напряжениями субгоризонтального сжатия, ориентированными в общем вкрест ее простирания. Изучение механизмов очагов землетрясений региона показывает, что и на современном этапе развития такие напряжения играют определяющую роль. Современные высокоточные геодезические GPS-измерения позволяют проверить эти представления и оценить их на количественной основе.

Система GPS является в настоящее время основным измерительным средством при решении самых разнообразных задач современной геодинамики на всех масштабных уровнях, на-

чиная с изучения деформаций в пределах отдельных горных сооружений и разломов и до глобальных перемещений литосферных плит. С середины 80-х годов в рамках ряда международных проектов такие работы проводятся в зоне взаимодействия Евразийской, Аравийской и Африканской литосферных плит. Исследования затронули территории Греции, Турции, Египта, Ирана, Армении, Азербайджана и Грузии. Правительства этих государств, понимая важность проводимых исследований прежде всего для оценки рисков природных катастроф, уделяют огромное внимание развитию национальных сетей GPS-станций. В качестве примера можно привести Национальную фундаментальную GPS-сеть Турции (TUTGA), которая состоит из 600 станций.

В результате национальных и международных исследований, проводимых в зоне взаимодействия этих трех крупных литосферных образований, к настоящему времени получена детальная оценка компонентов горизонтальных скоростей тектонических движений по GPS-измерениям, выполняемым с 1988 г. по настоящее время [16]. Скорости определены на основании данных 440 GPS-станций (337 полевых пунктов повторно-периодических измерений и 103 постоянно действующие станции).

В 90-х годах система GPS стала применяться для изучения современной геодинамики Кав-

<sup>1</sup> Миллюков В.К. – д. ф.-м. н. МГУ им. М.В. Ломоносова, зав. лаб. Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга, (vmillyukov@yandex.ru).

<sup>2</sup> Дробышев В.Н. – сотрудник Владикавказского научного центра РАН и СО-А.

<sup>3</sup> Миронов А.П. – м. н. с. МГУ им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга,

<sup>4</sup> Стеблов Г.М. – д. ф.-м. н., г. н. с. Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта, ст. н. с., зав. сектором геодинамического мониторинга ГС РАН, г. Обнинск.

<sup>5</sup> Хубаев Х.М. – сотрудник Владикавказского научного центра РАН и СО-А.

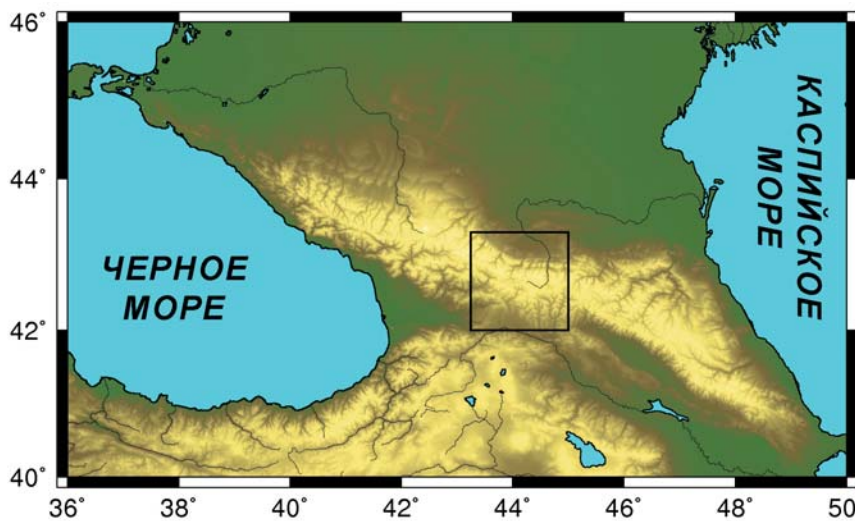


Рис. 1. Большой Кавказ и его осетинская часть (выделенный квадрат), являющаяся предметом исследования данной работы

казской горной системы, а также возможных постсейсмических деформаций в эпицентральной зоне сильнейшего из инструментально зафиксированных на Кавказе Рачинского землетрясения (29.04.1991 г.). Первые GPS-измерения были проведены в 1991–1997 годах в рамках Российско-Американского соглашения о совместных исследованиях в области охраны окружающей среды (Проект IX – исследования по предсказанию землетрясений) [3; 6; 16; 17; 14]. Вторые – в период 1993–1994 годов в рамках международного проекта SELF (SEa Level Fluctuations) [Becker, 2002]. Была создана сеть из двух десятков пунктов на территориях Армении, Грузии и России. Целью этих работ была оценка поля деформаций существенной части Альпийско-Гималайского подвижного пояса протяженностью около 3 000 км.

До последнего времени осетинская часть Большого Кавказа (рис. 1), будучи одним из самых тектонически активных регионов Кавказа, не была охвачена геодезическими спутниковыми измерениями. Начиная с 2010 года, авторами данной работы в осетинском регионе проводятся GPS-измерения [2]. Данные наблюдения являются первыми на этой территории и должны дать важный вклад в понимание геодинамики региона.

Целью данной работы является представление результатов геодинамического мониторинга современных горизонтальных движений основных элементов тектонической структуры осетинской части Большого Кавказа.

## ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ОСЕТИНСКОЙ ЧАСТИ БОЛЬШОГО КАВКАЗА

Традиционно Большой Кавказ делят по простиранию на Северо-Западный, Центральный, Восточный и Юго-Восточный. Осетинская часть располагается на восточном окончании Центрального Кавказа. По широте простирания она разделяется на зоны Главного хребта и Южного склона. Севернее располагается территория Предкавказья, а южнее – Закавказская межгорная депрессия.

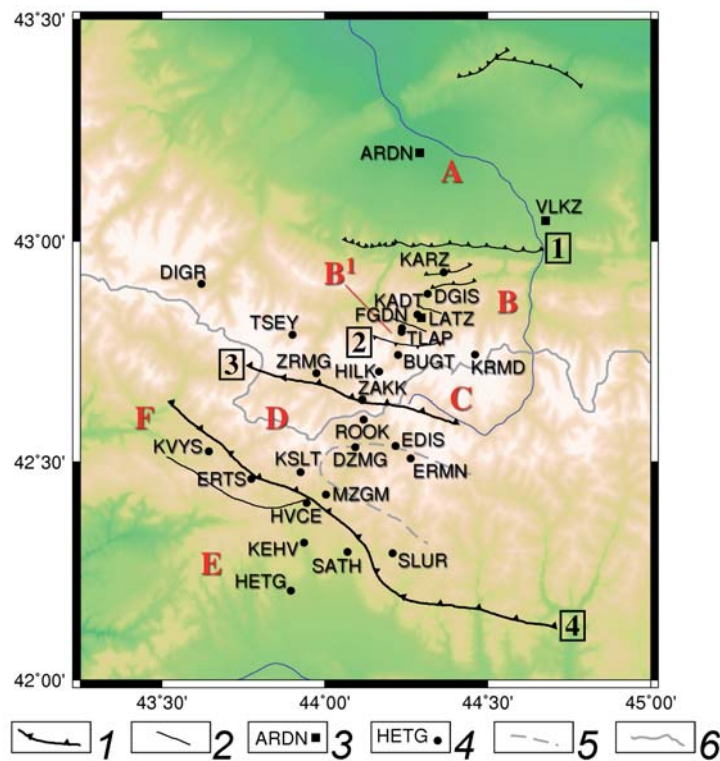


Рис. 2. Основные тектонические структуры и контактные зоны осетинской части Большого Кавказа и схема расположения 25 пунктов периодических мобильных GPS-измерений (названия пунктов приведены в таблице 1). Показаны также 3 стационарные GPS-станции региона (ARDN, VLKZ, LATZ)

Условные обозначения: 1 – основные надвижки; 2 – прочие разрывные нарушения; 3 – стационарные GPS/ГЛОНАСС станции и их кодовые названия; 4 – пункты мобильных GPS-измерений и их кодовые названия; 5 – условная граница срединной части Чиауро-Диббарского синклинария; 6 – Главный Кавказский хребет.

Цифры в квадратных рамках – основные надвижки: Владикавказский (1), Бурон-Ларский (2), Тибский (3), Орхевский (4). А-В-С-Д-Е-Ф – основные элементы тектонической структуры региона (см. пояснения в тексте)

На региональном уровне в осетинской части Большого Кавказа и на прилегающих территориях, для удобства описания построенной геодезической сети и результатов измерений, мы выделяем с севера на юг следующие основные элементы тектонической структуры (рис. 2):

– **Бесланская депрессия** (А) Восточного Предкавказья, с мощными толщами кайнозойских, мезозойских и, вероятно, палеозойских отложений (между Владикавказским надвигом на юге и Сунженским антиклинорием на севере);

– **Северный склон** (В) зоны Главного хребта Большого Кавказа, в пределах которого распространены преимущественно юрские и, в меньшей степени, меловые отложения (между Владикавказским и Бурон-Ларсским надвигами);

– **Фиагдонская антиклиналь** (В<sup>1</sup>), южная часть Северного склона зоны Главного хребта с древними кристаллическими породами фундамента в ядре антиклинали;

– **Полоса «основных сланцев»** (С), мощнейшие толщи ниже- и среднеюрских отложений (между Бурон-Ларсским и Тибским надвигами);

– **Чиауро-Диббарский синклиниорий** (D), прогиб Южного склона, выполнен мощнейшей толщей флишоидных верхнеюрских и меловых отложений (между Тибским и Орхевским надвигами); отдельно рассматриваются северное и южное крылья синклинория;

– **Грузинская глыба** (Е), выступ древнего кристаллического фундамента, перекрытого относительно маломощными породами юрского и кайнозойского возраста (к югу от Орхевского надвига);

– **Гагра-Джавская зона** (F), сложена мощными ниже- и среднеюрскими отложениями.

Осетинская часть Большого Кавказа характеризуется достаточно сложной складчато-надвиговой внутренней структурой [4; 5]. Южновергентные надвиги распространены на Северном склоне Большого Кавказа. Это Карцинский, Моравхохский, Кариухохский надвиги Скалистого хребта. Южновергентным является и Владикавказский надвиг в Черных горах. Надвиги (также южновергентные) Шаухохский, Адайком-Казбекский, Абайтикауский и некоторые другие выявлены в полосе «основных сланцев». К ряду южновергентных относится и Тибский надвиг. Кроме того, на границе зон Северного склона и «основных сланцев» проходит севервергентный Бурон-Ларсский надвиг. На границе зон Южного склона и Закавказской депрессии находится уже упоминавшийся южновергентный Орхевский надвиг.

Сложная геологическая структура района исследований, неравномерно распределенная сейсмичность позволяют говорить о его высокой современной геодинамической активности.

## ОСЕТИНСКАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ СЕТЬ СТАНЦИЙ И ПУНКТОВ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ

В 2010–2013 гг. были проведены четыре полевых кампании, в результате которых, в соответствии с тектоническим строением исследуемого региона была создана сеть, состоящая из 25 геодезических пунктов для проведения периодически-повторных измерений мобильной GPS-аппаратурой (полевых пунктов). В 2010 г. были созданы первые 8 пунктов, в 2011 г. – 6, в 2012 г. – 6 и в 2013 г. – 5 (рис. 2, табл. 1). Эта геодезическая сеть пересекает основные геологические структуры и контактные зоны осетинской части Большого Кавказа. С 2011 г. на исследуемой территории Осетии действуют стационарные GPS/GLONASS станции ARDN, LATZ и VLKZ Геофизической службы РАН.

Зональная привязка стационарных станций и полевых пунктов с севера на юг следующая (рис. 2 и табл. 1).

Стационарные станции ARDN и VLKZ находятся в пределах Бесланской депрессии Предкавказья (зона А) в пос. Ардон и г. Владикавказ. Южнее, в долинах рек Фиагдон и Большая Лиакхва, в пределах собственно Большого Кавказа располагается группа мобильных пунктов и одна стационарная станция. На Северном склоне зоны Главного хребта Большого Кавказа (зона В) это пункты KARZ, DGIS, KADT и станция LATZ. Пункты FGDN и TLAP установлены в ядре Фиагдонской антиклинали (зона В<sup>1</sup>), ограниченной с юга Бурон-Ларсским надвигом. Далее к югу, в полосе «основных сланцев» (зона С) следуют пункты BUGT, HILK, ZAKK и ZRMG. В Чиауро-Диббарском синклинории (зона D) расположена группа пунктов ROOK, EDIS, ERMN, DZMG, KSLT, MZGM, SLUR. В пределах Грузинской глыбы (зона Е) расположены пункты HVCE, SATH, KEHV, HETG. Пункты KVYS и ERTS находятся в Гагра-Джавской зоне (F). Элементы тектонической структуры, на которых расположены пункты DIGR, TSEY и KRMD, на текущий момент не идентифицированы.

Группа из 15 мобильных пунктов – KARZ, DGIS, KADT, FGDN, TLAP, BUGT, HILK, ZAKK, ROOK, DZMG, KSLT, MZGM, HVCE, KEHV и HETG и двух стационарных станций ARDN и LATZ – формируют профиль, ориентированный с юго-юго-запада на северо-северо-восток. Данный профиль вдоль долин рек Большая Лиакхва и Фиагдон пересекает приблизительно по линии HETG–ARDN Главный Кавказский хребет. Вкрест основному профилю созданы дополнительно два профиля. Первый состоит из 7 пунктов – KVYS, ERTS, HVCE, KEHV, MZGM, SATH, SLUR – и ориентирован вдоль Орхевского надвига. Второй ориентирован вдоль Тибского надвига и состоит из пунктов ZRMG, ZAKK и ROOK.



Таблица 1

Названия, координаты (в системе WGS84) полевых пунктов и стационарных станций (ARDN, VLKZ, LATZ) GPS-измерений в Осетии и даты проведения измерений

Зона	Код	Долгота, градусы	Широта, градусы	Высота, м	Измерительные кампании (год/месяц/день)			
					2010	2011	2012	2013
A	ARDN	44.2910	43.1200	408		с 2011/11/20 по наст. время		
	VLKZ	43.0462	44.6777	706		с 2011/10/11 по наст. время		
B	KARZ	44.3654	42.9293	894			2012/11/08 – 2012/11/13	2013/08/18 – 2013/08/20
	DGIS	44.3154	42.8810	1214				2013/08/25 – 2013/08/28
	KADT	44.2839	42.8337	1357				2013/08/25 – 2013/08/29
	LATZ	42.8266	44.2958	1273		с 2011/11/19 по наст. время		
B <sup>1</sup>	FGDN	44.2370	42.8034	1483			2012/10/30 – 2012/11/06	2013/08/29 – 2013/09/02
	TLAP	44.2360	42.7941	1571				2013/08/29 – 2013/09/02
C	BUGT	44.2250	42.7418	2072			2012/10/25 – 2012/10/29	2013/10/31 – 2013/11/03
	HILK	44.1666	42.7043	2570			2012/10/25 – 2012/10/30	2013/10/31 – 2013/11/03
	ZRMG	43.9736	42.7001	1771		2011/08/05	2012/11/28 – 2012/12/02	2013/10/13 – 2013/10/17
	ZAKK	44.1155	42.6404	2155			2012/11/08 – 2012/11/13	2013/06/10 – 2013/06/13, 2013/10/25 – 2013/10/31
D	ROOK	44.1194	42.5965	2044	2010/06/25	2011/07/30 – 2011/07/31	2012/10/02 – 2012/10/05	2013/10/07 – 2013/10/10
	EDIS	44.2172	42.5366	1983		2011/08/02	2012/10/16 – 2012/10/20	2013/10/03 – 2013/10/07
	DZMG	44.0938	42.5331	1452	2010/06/24 – 2010/06/25	2011/07/30 – 2011/07/31	2012/10/02 – 2012/10/04	2013/10/07 – 2013/10/10
	ERMN	44.2635	42.5076	2274		2011/08/01	2012/10/16 – 2012/10/20	2013/10/03 – 2013/10/07
	KSLT	43.9255	42.4765	1632				2013/09/26 – 2013/09/30
	MZGM	44.0037	42.4249	1222	2010/06/26 – 2010/06/27	2011/07/28 – 2011/07/29	2012/10/06 – 2012/10/09	2013/09/30 – 2013/10/03
	SLUR	44.2078	42.2910	1274				2013/09/18 – 2013/09/21
E	HVCE	43.9445	42.4062	1115	2010/06/25	2011/07/31 – 2011/08/01	2012/10/06 – 2012/10/09	2013/09/30 – 2013/10/02
	KEHV	43.9368	42.3154	979	2010/06/25 – 2010/06/26	2011/07/31		2013/09/26 – 2013/09/30
	SATH	44.0698	42.2942	1043				2013/09/18 – 2013/09/21
	HETG	43.8965	42.2054	947	2010/06/26	2011/07/26 – 2011/07/27	2012/09/23 – 2012/09/28	2013/09/14 – 2013/09/17
F	KVYS	43.6446	42.5238	1365		2011/07/29 – 2011/07/30	2012/09/28 – 2012/10/01	2013/09/23 – 2013/09/26
	ERTS	43.7748	42.4608	1812		2011/07/29 – 2011/07/30	2012/09/28 – 2012/10/01	2013/09/23 – 2013/09/25
	DIGR	43.6217	42.9033	1761		2011/07/08 – 2011/07/09	2012/09/09 – 2012/09/13	2013/08/12 – 2013/08/15, 2013-12-02 – 2013-12-05
	TSEY	43.9013	42.7880	1915	2010/04/07 – 2010/04/18	2011/08/03 – 2011/08/07	2012/02/27 – 2012/02/29, 2012/11/28 – 2012/12/02	2013/10/25 – 2013/10/28
	KRMD	44.4614	42.7424	2951	2010/09/26 – 2010/09/27	2011/09/04 – 2011/09/08		2013/09/05 – 2013/09/09

Техническую базу проведения полевых измерений составляют двухчастотные приемники Javad Lexion-GGD112T (L1/L2 GPS/GLONASS) с антеннами MarAnt+. Пункты сети оснащены геодезическими маркерами, вмурованными в скальную породу. Свободный конец маркера имеет резьбовое крепление, на которое через штатив устанавливается GPS-антенна, что позволяет проводить многократные измерения на пункте без предварительных юстировочных работ. Такая система закладки геодезических меток считается общепринятой для мобильной GPS-съёмки в мировой практике. Геодезические маркеры изготовлены по образцам, используемым в европейских сетях GPS-наблюдений (рис. 3).

В основу оценки скоростей положен анализ временных рядов координат GPS пунктов и станций, вычисляемых из первичных данных, которые представляют собой наборы фазовых и кодовых измерений на двух частотах продолжительностью трое суток с интервалом регистрации 30 сек. Для обработки наблюдений на геодезических пунктах необходимо иметь отсчетную основу, состоящую из координат базовых (опорных) GPS-станций. В качестве опорных использовались 6 станций мировой сети IGS, расположенные на удалении до 2 000 км от исследуемого региона: ARTU (Арти, Урал), BUCU (Бухарест, Румыния), CRAO (Крым), MOBN (Обнинск, Московская обл.), TERN (Тегеран, Иран) и ZECK (Зеленчукская, Северный Кавказ). Выбранные опорные станции входят в реализацию международной общеземной отсчетной основы ITRF2008.

Обработка GPS-данных выполнялась программным пакетом GAMIT/GLOBK [8; 9; 12; 11; 13] на комплексе хранения и обработки астрономических данных ГАИШ МГУ.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

По измерительным кампаниям 2010–2013 гг., оценки скоростей движений получены для 17 полевых пунктов и трех стационарных станций региона.

В общеземной системе координат ITRF2008 (рис. 4, табл. 2) горизонтальные движения пунктов Осетинской геодезической сети характеризуются устойчивой общей северо-восточной направленностью и большими (27–30 мм/год) скоростями смещений, что в целом совпадает с оценкой скоростей современных движений Северного Кавказа по наблюдениям на стационарных GPS-станциях Северо-Кавказского деформационного массива [15]. Быстрое смещение Северного Кавказа обусловлено общим тектоническим движением контактной зоны смежных Евразийской и Аравийской литосферных плит [10].

Величина и направление движений отдельных геодезических пунктов, в системе отсчета,



**Рис. 3.** Вверху – геодезический маркер с анкерным болтом, штатив для крепления антенны (вертикальный цилиндр) и защитный колпачок на резьбу маркера. Внизу – пример установки мобильной GPS-антенны JAVAD на геодезический маркер на пункте HVCE

связанной с неподвижной Евразией, отображает особенности региональной кинематики (рис. 5, табл. 3). Полученные значения скоростей позволяют провести интерпретацию геодинамической обстановки региона. Можно отметить преобладание субмеридиональных, с той или иной степенью отклонения от меридиана, североориентированных GPS-векторов смещений геодезических пунктов. Такая североориентированность по-видимому связана с сближением Аравийской и Евразийской литосферных плит, что происходит, как известно, в субмеридиональном направлении [14]. Это можно рассматривать как результат давления Аравийской литосферной плиты, северный дрейф которой считается причиной формирования тектонической структуры и

современной геодинамики Кавказа.

В этом же субмеридиональном направлении, практически совпадая с направлением сближения смежных литосферных плит, ориентирован профиль геодезических пунктов HETG – ARDN, пересекающий осетинскую часть Большого Кавказа вдоль рек Б. Лихва – Фиадон (азимут  $21.64^\circ$ ). Приблизительно также ориентированы и основные напряжения субгоризонтального сжатия, приводящие к современным перемещениям элементов этой структуры. В этой связи рассмотрим более детально смещения геодезических пунктов и стационарных станций в полосе профиля HETG – ARDN в локальной системе отсчета.

В качестве опорной станции, определяющей локальную систему отсчета, разумно выбрать стационарную GPS-станцию ARDN. Она располагается в поселке Ардон в средней части Бесланской депрессии Восточного Предкавказья. Судя по имеющимся данным [1; 4], эта часть депрессии характеризуется практически горизонтальным залеганием всех выполняющих депрессию слоистых осадочных отложений. Это дает основание считать эту ее часть практически недеформированной и, следовательно, предположить отсутствие здесь каких-либо локальных смещений пункта или минимальную их величину.

На рис. 6 и в табл. 4 представлены продольные (азимут  $21.64^\circ$ ) и перпендикулярные (азимут  $111.64^\circ$ ) компоненты смещений GPS-пунктов в направлении профиля HETG – ARDN. Грузинская глыба, представленная пунктами HETG, KEHV и

Таблица 2

Широтные и меридиональные компоненты ( $V_e$  и  $V_n$ ) и полные вектора скоростей ( $V_{en}$ ) горизонтальных смещений полевых пунктов и стационарных станций GPS с ошибками их определений ( $\sigma V$ ) в системе координат ITRF2008 по измерениям 2010–2013 гг.

Зона	Код	Скорость смещения и ошибка, мм/год						Азимут, градусы
		$V_e$	$\sigma V_e$	$V_n$	$\sigma V_n$	$V_{en}$	$\sigma V_{en}$	
A	ARDN	25.57	0.18	11.62	0.20	28.09	0.19	СВ 66
	VLKZ	25.21	0.1	12.41	0.11	28.1	0.11	СВ 64
B	LATZ	25.43	0.10	11.26	0.12	27.81	0.11	СВ 66
C	BUGT	26.95	1.91	7.33	1.92	27.93	1.92	СВ 75
	HILK	26.36	2.32	17.46	2.72	31.62	2.53	СВ 56
	ZAKK	28.36	1.32	10.53	1.65	30.25	1.49	СВ 70
	ZRMG	32.44	1.98	5.59	2.56	32.92	2.29	СВ 80
D	DZMG	25.19	1.30	12.50	1.40	28.12	1.35	СВ 64
	EDIS	22.85	1.08	13.23	1.41	26.40	1.26	СВ 60
	ERMN	30.24	0.96	12.34	1.17	32.66	1.07	СВ 68
	MZGM	24.34	1.13	13.97	1.27	28.06	1.20	СВ 60
E	ROOK	24.75	0.93	12.69	1.16	27.81	1.05	СВ 63
	HETG	27.63	0.83	13.06	1.02	30.56	0.93	СВ 65
	HVCE	26.49	1.55	11.20	1.82	28.76	1.69	СВ 67
F	KEHV	24.87	1.15	13.47	1.25	28.28	1.20	СВ 62
	ERTS	26.00	1.45	5.35	1.86	26.54	1.67	СВ 78
	KVYS	18.74	1.62	9.31	1.96	20.93	1.80	СВ 64
	DIGR	28.16	1.35	11.03	2.09	30.24	1.76	СВ 69
	KRMD	24.46	0.79	12.20	0.95	27.33	0.87	СВ 63
	TSEY	26.20	1.25	16.65	1.49	31.04	1.38	СВ 58

Таблица 3

Широтные и меридиональные компоненты ( $V_e$  и  $V_n$ ) и полные вектора скоростей ( $V_{en}$ ) горизонтальных смещений полевых пунктов и стационарных станций GPS с ошибками их определений ( $\sigma V$ ) в Евразийской системе координат (EURA) по измерениям 2010–2013 гг.

Зона	Код	Скорость смещения и ошибка, мм/год						Азимут, градусы
		$V_e$	$\sigma V_e$	$V_n$	$\sigma V_n$	$V_{en}$	$\sigma V_{en}$	
A	ARDN	-0.26	0.16	1.75	0.18	1.77	0.17	СЗ 352
	VLKZ	-0.62	0.08	2.43	0.09	2.51	0.09	СЗ 346
B	LATZ	-0.35	0.08	1.33	0.1	1.38	0.09	СЗ 345
C	BUGT	1.04	1.67	-1.88	1.67	2.15	1.67	ЮВ 151
	HILK	0.60	2.32	7.73	2.72	7.75	2.53	СВ 4
	ZAKK	2.02	1.15	0.96	1.44	2.24	1.30	СВ 65
	ZRMG	6.63	1.98	-4.00	2.56	7.74	2.29	ЮВ 121
D	DZMG	-0.46	1.30	2.76	1.40	2.80	1.35	СЗ 351
	EDIS	-2.60	0.93	3.21	1.23	4.13	1.09	СЗ 321
	ERMN	4.05	0.96	2.58	1.17	4.80	1.07	СВ 58
	MZGM	-0.89	0.97	3.66	1.12	3.77	1.05	СЗ 346
E	ROOK	-0.78	0.79	2.52	1.02	2.64	0.91	СЗ 343
	HETG	1.65	0.71	3.16	0.86	3.56	0.79	СВ 28
	HVCE	0.86	1.55	1.50	1.82	1.73	1.69	СВ 30
F	KEHV	-0.62	1.00	2.67	1.09	2.74	1.05	СЗ 347
	ERTS	0.12	1.23	-2.17	1.59	2.17	1.42	ЮВ 177
	KVYS	-7.29	1.61	1.21	1.96	7.39	1.79	СЗ 279
	DIGR	2.07	1.35	1.10	2.09	2.34	1.76	СВ 62
	KRMD	-1.24	0.79	2.56	0.95	2.84	0.87	СЗ 334
	TSEY	0.52	1.25	6.98	1.49	7.00	1.38	СВ 4

Положительные значения соответствуют смещениям в восточном (широтная компонента) и северном (меридиональная компонента) направлениях.

HVCE, смещается в субмеридиональном направлении, с постепенным падением скорости с 2 мм/год до 0,2 мм/год при приближении к Орхевскому надвигу.

Смещение прилегающего к Орхевскому над-



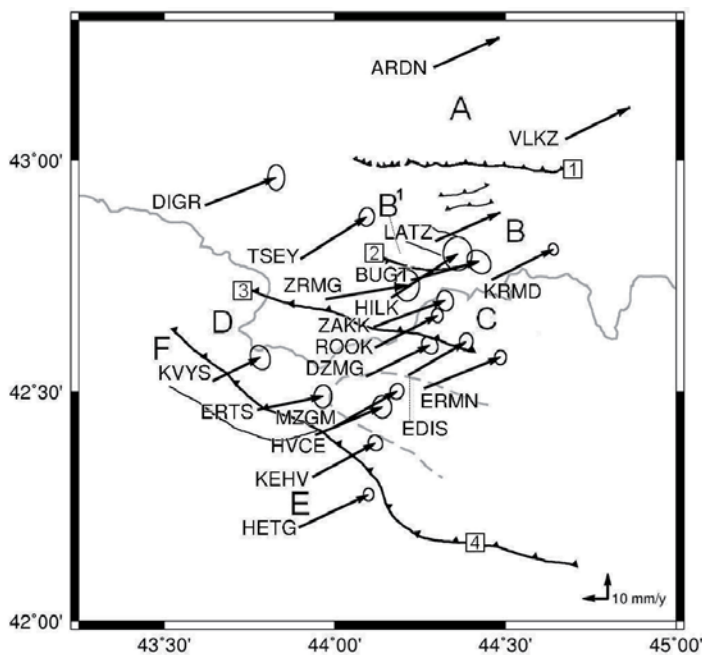


Рис. 4. Векторы GPS-скоростей горизонтальных смещений станций и пунктов осетинской геодезической сети относительно системы ITRF2008 и эллипсы ошибок  $1\sigma$

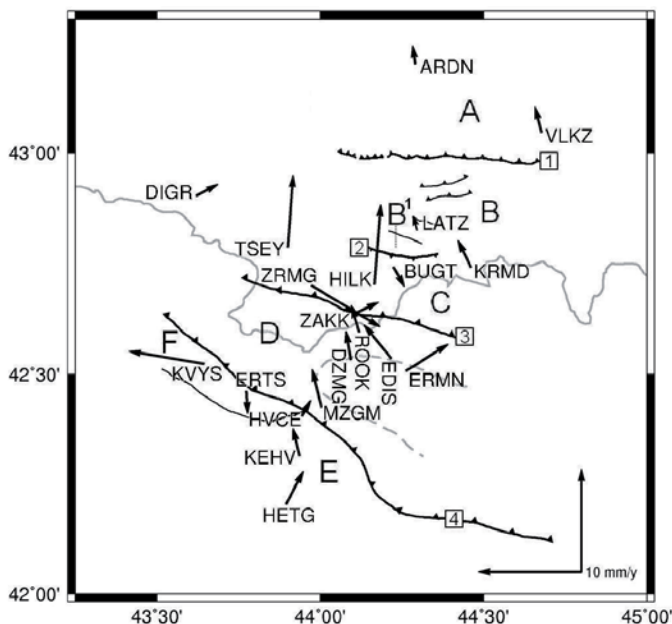


Рис. 5. Векторы GPS-скоростей горизонтальных смещений станций и пунктов осетинской геодезической сети относительно неподвижной Евразии.

вигу Чиауро-Дибрарского синклиория в субмеридиональном направлении также характеризуется падением скорости при приближении к Тибскому надвигу. Это пункты MZGM (1,54 мм/год), ERMN (2,36 мм/год), DZMG (0,87 мм/год) и EDIS (0,49 мм/год), и ROOK (0,52 мм/год).

Таким образом, на фоне общего напряжения субгоризонтального сжатия на Орхевском надвиге имеет место напряженное состояние растяжения (распора), связанного, возможно, с увеличением пород в этой части сооружения. Можно оценить величину скорости растяжения. Из простейшей системы уравнений

$$v - \Delta v = 0,18 \text{ мм/год (HVCE)},$$

$$v + \Delta v = 1,54 \text{ мм/год (MZGM)}$$

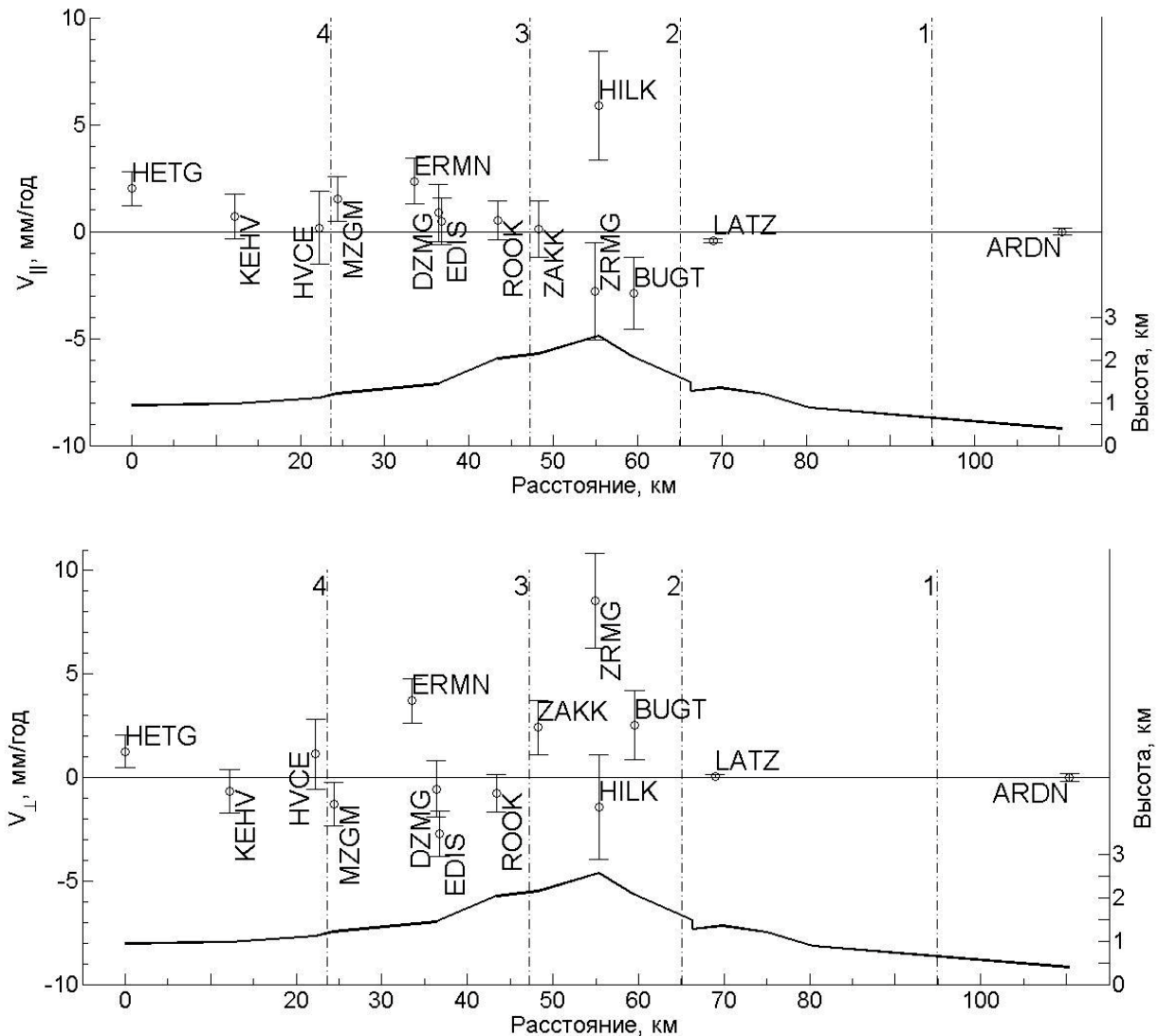
следует  $\Delta v = 0,68$  мм/год, где  $v$  – скорость субгоризонтального сжатия,  $\Delta v$  – скорость субгоризонтального растяжения на этом структурном элементе.

Очень интересные результаты получены по полосе «основных сланцев». Два из четырех имеющихся в этой полосе пунктов (ZRMG и BUGT) характеризуются перемещениями в южном (!) направлении практически с одинаковой, достаточно большой скоростью, ~2,8 мм/год. Это означает, что эти пункты перемещаются в направлении, противоположном перемещениям Аравийской плиты и Грузинской глыбы. При этом они удаляются от опорной станции ARDN. Такое южное перемещение перечисленных пунктов, а также падение скорости смещения в северном направлении на южной границе Тибского надвига, могут быть связаны с продолжающимся в настоящее время формированием упоминавшихся южновергентных надвигов (Шаухохского, Адайком-Казбекского, Абайтикауского, Тибского), известных здесь по геологическим данным [5]. В то же время один пункт из этой полосы (HILK) смещается в северном направлении со скоростью 5,9 мм/год. Такая «аномальность» пункта требует дополнительной проверки его перемещения.

Стационарная станция LATZ в пределах Северного склона Большого Кавказа так же, как и пункты в зоне «основных сланцев», смещается в южном направлении. Она удаляется от станции ARDN с небольшой скоростью. Но делать какие-либо выводы по единственному пункту применительно ко всей зоне Северного склона пока преждевременно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате полевых работ 2010–2013 г.г. в осетинской части Большого Кавказа была создана сеть геодезических пунктов, для проведения периодически-повторных измерений мобильной GPS-аппаратурой. Эта геодезическая сеть, со-



**Рис. 6.** Значения продольных (а) и перпендикулярных (б) компонент GPS-скоростей и среднеквадратические ошибки горизонтальных смещений станций и пунктов осетинской геодезической сети в полосе профиля HETG – ARDN в локальной системе координат, определенной стационарной станцией ARDN. Положительные значения продольных компонент соответствуют смещениям в направлении С-СВ (азимут  $21.64^{\circ}$ ); положительные значения перпендикулярных компонент соответствуют смещениям в направлении Ю-ЮВ (азимут  $111.64^{\circ}$ ). Вертикальными линиями обозначены в соответствии с рис.2 основные надвиги региона. На рисунке также показаны высоты профиля

стоящая из 25 пунктов, пересекает основные геологические структуры и контактные зоны исследуемого региона. В регионе также действуют три стационарные GPS/GLONASS-станции: ARDN, LATZ и VLKZ. Обработка данных наблюдений, выполненная программным пакетом GAMIT/GLOBK, позволила получить оценки скоростей движений для 17 полевых пунктов и трех стационарных станций региона. Оценки скоростей горизонтальных смещений приведены в трех системах отсчета: в общемировой системе координат ITRF2008, относительно неподвижной Евразии и в локальной системе отсчета, определенной стационарной станцией ARDN. Последняя обо-

снована тем, что станция ARDN расположена в срединной части Бесланской депрессии Восточного Предкавказья, характеризующейся минимальными скоростями смещений.

Профиль геодезических пунктов HETG – ARDN, пересекающий осетинскую часть Большого Кавказа вдоль рек Б. Лиахва – Фиагдон, ориентирован в субмеридиональном направлении (азимут  $21.64^{\circ}$ ). Приблизительно также ориентированы и основные напряжения субгоризонтального сжатия, приводящие к современным перемещениям элементов этой структуры. Полученные данные для скоростей смещений GPS-пунктов в направлении профиля HETG – ARDN



Таблица 4

Продольные ( $V_{||}$ ) и перпендикулярные ( $V_{\perp}$ ) компоненты GPS-скоростей горизонтальных смещений полевых пунктов и стационарных станций Осетинской геодезической сети в направлении профиля HETG – ARDN в локальной системе координат, определенной стационарной станцией ARDN, по измерениям 2010–2013 гг.

Зона	Код	$V_{  }$ (мм/год)	$V_{\perp}$ (мм/год)	$\sigma V$ (мм/год)
A	ARDN	0.00	0.00	0.17
	VLKZ	0.50	-0.59	0.09
B	LATZ	-0.42	0.07	0.09
C	BUGT	-2.89	2.55	1.67
	HILK	5.88	-1.41	2.53
	ZAKK	0.11	2.41	1.3
	ZRMG	-2.80	8.52	2.29
D	EDIS	0.49	-2.71	1.09
	ERMN	2.36	3.70	1.07
	ROOK	0.52	-0.77	0.91
	DZMG	0.87	-0.56	1.35
	MZGM	1.54	-1.29	1.05
E	HVCE	0.18	1.13	1.69
	KEHV	0.72	-0.67	1.05
	HETG	2.01	1.26	0.79
F	ERTS	-3.50	1.80	1.42
	KVYS	-3.09	-6.34	1.79
	DIGR	0.26	2.41	1.76
	KRMD	0.39	-1.21	0.87
	TSEY	5.15	-1.20	1.38

Положительные значения продольных компонент соответствуют смещениям в направлении С-СВ (азимут 21.64°); положительные значения перпендикулярных компонент соответствуют смещениям в направлении Ю-ЮВ (азимут 111.64°)

позволили выявить ряд интересных особенностей региона.

Выявлено, что на фоне общего движения в северо-восточном направлении южная граница Орхевского надвига смещается в противоположном направлении. Непротиворечиво этот факт можно объяснить тем, что помимо общего напряжения субгоризонтального сжатия на Орхевском надвиге имеет место напряженное состояние растяжения, связанного, по-видимому, с увеличением пород в этой части сооружения. Этот результат является новым в понимании современной геодинамики осетинской части Большого Кавказа и требует дальнейшего исследования.

Полученные данные об удалении полосы «основных сланцев» от опорной станции ARDN в южном направлении не согласуются с тем, что следовало бы ожидать в рамках плит-тектонической концепции. Эта концепция применительно к рассматриваемому горному сооружению исходит из представления о сближении смежных Евразийской и Аравийской литосферных плит и блоков земной коры как причины тектогенеза Большого Кавказа. По-видимому, это также связано с продолжающи-

мися локальными геологическими процессами формирования южновергентных надвигов (Шаухохского, Адайком-Казбекского, Абайтикауского, Тибского).

Новые эпохи измерений на геодезических пунктах осетинской части Большого Кавказа позволят уточнить и детализировать представления о современных движениях и внутренних процессах, определяющих геодинамику этого региона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Барковская К.С., Безбородов Р.С., Брод И.О., Буньков М.С., Гринфельд М.И., Живаго Н.В., Ибрагимов Д.М., Кудрявцев М.П., Леонов Г.П., Москвин М.М., Назаров Р.И., Несмеянов Д.В., Николенько В.А. Геологическое строение восточной части северного склона Кавказа. Тр. Комплексн. южной геол. экспедиции. Вып. 2. – Л.: Гостоптехиздат. 1960. 320 с.
2. Миллюков В.К., Дробышев В.Н., Торчинов Х.М.З., Хубаев Х.М. Изучение геодинамики Горной Осетии в 2009–2011 гг. // Вестник ВНИЦ РАН и РСО-А, Т. 11, № 4, 2011 г. С. 49–53.
3. 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 GSP-технологии. // Физика Земли. 1997. № 6. С. 68–75.
4. Шевченко В.И. Происхождение структур горизонтального сжатия в складчатом сооружении. – М.: Наука. 1984. 160 с.
5. Шевченко В.И. Строение Главного хребта Центрально-го Кавказа между реками Ардон и Терек // Бюл. МОИП, Отд. геол. 2002. Вып. 2. С. 19–29.
6. 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 сейсмологическим данным) // Физика Земли. 1999. № 9. С. 3–18.
7. Becker M., Zerbinib S., Bakerc T., Bürkid B., Galanise J., Garatef J., Georgiev I., Kahled H.-G., Kotzev V., Lobazovh V., Marsoni I., Negusinib M., Richtera B., Veise G., Yuzefovich P. Assessment of height variations by GPS at Mediterranean and Black Sea coast tide gauges from the SELF projects // Global and Planetary Change. 2002. Volume 34. Issues 1-2. P. 5-35. DOI: 10.1016/S0921-8181(02)00103-0
8. Dong D.-N., Herring T. A., and King R. W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic

data // J. Geod. 1998. 72. P. 200–214.

9. Feigl K.L., Agnew D.C., Bock Y., Dong D.-N., Donnellan A., Hager B. H., Herring T.A., Jackson D.D., King R.W., Larsen S. K., Larson K.M., Murray M.H., and Shen Z.-K. Measurement of the velocity field in central and southern California // J. Geophys. Res. 1993. 98. P.21667–21712.

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

11. 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. 12

12. Herring, T.A. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Version 10.1. Internal Memorandum. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2003.

13. King, R. W. and Y. Bock. Documentation for the GAMIT analysis software, release 9.7. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1998.

14. 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., Toksüz 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. Issue B3. P. 5695–5719.

15. Milyukov Vadim, Alexander Kopaev, Vladimir Zharov, Alexey Mironov, Andrey Myasnikov, Mark Kaufman, Dmitry Duev. Monitoring crustal deformations in the Northern Caucasus using a high precision long base laser strainmeter and the GPS/GLONASS network // Journal of Geodynamics. 2010. V. 49. No. 3-4. P. 216-223.

16. 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 // Geophysical Research Letters. 1997.V. 24 No 14. P. 1815–1818.

17. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi A., Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrova A., Filikov S.V., Gomez F., Al-Ghazzi R., and Gebran Karam. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // Journal of Geophysical Research. 2006.V. 111. No. B5. P. B05411.

## OSSETIAN GEODETIC SATELLITE NETWORK: CREATION AND FIRST RESULTS OF GEODINAMIC MONITORING

Milyukov V.K.<sup>1</sup>, Drobishev V.N.<sup>3</sup>, Mironov A.P.<sup>1</sup>,  
Steblov G.M.<sup>2</sup>, Hubaev H.M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia, (milyukov@sai.msu.ru)

<sup>2</sup>Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Science, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Vladikavkaz Scientific Center of Russian Academy of Science and Republic of North Ossetia - Alania, Vladikavkaz, Russia

**Abstract.** The Ossetian part of the Greater Caucasus, being one of the most tectonically active regions of the Caucasus, until recently wasn't covered by the high-precision geodetic measurements based on satellite methods. Since 2010 the network of geodetic points for carrying out the periodically - repeated measurements by the mobile GPS equipment was developed in this region by the authors of this work, and also three permanent GPS stations were established. The technique of data processing and results of GPS measurements in 2010-2013 are given in this work. Estimates of velocities of horizontal movements are given in three reference systems: in the terrestrial coordinate system ITRF2008, relative to fixed Eurasia and in the local reference system determined by the stationary station ARDN. The obtained results, besides the general submeridional movement of the region connected with convergence of the Eurasian and Arabian plates, revealed a number of the tectonic features caused, apparently, by continuing local processes of formation of the tectonic structure of this region.

**Keywords:** satellite geodesy, GPS measurements, modern earth crust motion, regional tectonic processes

