

УДК 551.242.1

## ОЦЕНКИ СКОРОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА ПО GPS НАБЛЮДЕНИЯМ

© 2015 г. В. К. Милуков<sup>1</sup>, А. П. Миронов<sup>1</sup>, Е. А. Рогожин<sup>2</sup>, Г. М. Стеблов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, 119991, Москва, Университетский просп., 13  
e-mail: vmilyukov@yandex.ru

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10  
Поступила в редакцию 06.05.2014 г.

В статье представлено поле скоростей Северного Кавказа, полученное по результатам наблюдений на станциях СКГС, характерным аспектом которого относительно ITRF2008 (International Terrestrial Reference System) является заметное горизонтальное смещение в северо-восточном направлении со скоростью 26–28 мм/год. Относительно неподвижной Евразии выявлено общее сжатие региона со скоростью 1–2 мм/год, которое является источником современной геологической и сейсмической активности в пограничной области Кавказа и Восточно-Европейской платформы.

*Ключевые слова:* современные движения земной коры, спутниковая геодезия

DOI: 10.7868/S0016853X15030042

### ВВЕДЕНИЕ

Северная часть Большого Кавказа является одним из наиболее геодинамически активных регионов России. Особенности геодинамики региона в широком смысле обусловлены взаимодействием двух крупных литосферных плит — Евразийской и Аравийской. Регион представляет собой типичный пример коллизионной тектоники, характеризующейся деформацией сжатия в субмеридиональном направлении, растяжением в субширотном направлении и общим поднятием горной системы Большого Кавказа. В результате регион характеризуется наличием активных сейсмогенных разломов. В центральной части складчатого сооружения развиты также молодые вулканы, крупнейшие из которых, Эльбрус и Казбек, расположены в непосредственной близости от Главного хребта Кавказа.

Изучение динамики движения и взаимодействия плит (т.е. первичных сил, действующих на плиты), а также реологии континентальной литосферы является одной из важных фундаментальных проблем активной геотектоники [16, 28–30]. В настоящее время в науках о Земле господствует концепция тектоники литосферных плит. Согласно представлениям этой концепции, формирование внутренней тектонической структуры подвижных поясов (типа Альпийско-Гималайского пояса) и подвижных сооружений определяется сближением литосферных плит. Применительно к

Большому Кавказу эта точка зрения подразумевает в качестве источника его деформирования приближение в суб-меридиональном направлении Аравийской литосферной плиты к смежной окраине восточно-европейской части Евразийской плиты. Сближение этих плит установлено в результате GPS измерений [23, 27]. Предполагается, что в результате этих горизонтальных смещений кавказский сегмент Альпийско-Гималайского подвижного пояса сжимается, слои осадочных и вулканических пород сминаются в складки, блоки основания испытывают разнонаправленные смещения, а верхние горизонты коры нарушаются взбросами и надвигами. Некоторые исследователи полагают, что воздействие северного дрейфа Аравийской плиты сказывается на распределении горизонтальных напряжений в пределах Евразийской плиты на расстояние до полутора–двух тысяч километров от южного края последней [4, 5, 7].

В исторической ретроспективе первые исследования современной геодинамики Кавказской горной системы с использованием GPS приемников были проведены в начале 90-х гг. 20 века. В 1991 г. в рамках Российско-Американского соглашения о совместных исследованиях в области охраны окружающей среды (Проект IX — исследования по предсказанию землетрясений) [12, 26, 27]. Измерения на Кавказе были продолжением региональных исследований в Средиземноморье (Греция, Турция, Египет и Израиль), начатых в 1988 г. В результате была впервые получена карта современных

движений Кавказского региона и смежных частей Азии.

Помимо Российско-Американского Проекта IX, в период 1993–1994 гг. на Северном Кавказе проводились исследования в рамках международного проекта SELF (SEa Level Fluctuations) [15]. Это был крупномасштабный проект, направленный на изучение изменения уровня Средиземного и Черного морей. В полевых работах были определены координаты более двадцати наблюдательных пунктов, в частности четырех пунктов на Северном Кавказе: “Терскол”, “Чегет”, “Тырныауз” (Кабардино-Балкария) и “Зеленчукская” (Карачаево-Черкесия). Последний пункт располагался на территории Зеленчукской радиоастрономической обсерватории Института прикладной астрономии (ИПА) РАН и в дальнейшем был преобразован в постоянно действующую GPS станцию. Априорные координаты пункта: широта  $43^{\circ}47' N$ , долгота  $41^{\circ}34' E$ , высота над уровнем моря 1166 м. Станция оборудована принимающим устройством и системой сбора данных, в соответствии со стандартами Европейской сети EUREF. В 1997 г. станция Зеленчукская была включена в сеть опорных станций международной службы IGS (International GNSS Service) с кодом ZECK, и в настоящее время она входит в реализацию международной земной системы отсчета ITRF2008. В течение почти десятилетия “Зеленчукская” оставалась единственной постоянно действующей GPS станцией на Кавказе.

Начиная с 2005 г. ГАИШ МГУ создал на Северном Кавказе три новых постоянных станции GPS/ГЛОНАСС наблюдений. Первая из них станция Терскол расположена на территории Терскольской международной обсерватории на высоте 3100 м, вблизи вулкана Эльбрус. Код станции TRSK. В стационарном режиме сбора данных станция начала работать с 2005 г. Априорные координаты: широта  $43^{\circ}16' N$ , долгота  $42^{\circ}30' E$ , высота 3122 м над уровнем моря. Вторая станция “Кисловодск” размещена на горе Шатджатмаз (Карачаево-Черкесия) на территории Горной солнечной станции Пулковской обсерватории РАН, код станции KISL. Регулярные наблюдения ведутся с 2006 г. Координаты станции: широта  $43^{\circ}44' N$ , долгота  $42^{\circ}39' E$ , высота 694 м. Третья станция организована в 2008 г. совместно с Владикавказским Научным Центром РАН и Центром геофизических исследований ВНИЦ РАН, антенна станции установлена на крыше здания Центра геофизических исследований. Код станции VLKK. Априорные координаты станции: широта  $43^{\circ}02' N$ , долгота  $44^{\circ}41' E$ , высота 696 м. Станции KISL, TRSK оснащены антеннами Topcon CR-G3 Choke Ring и приемниками JAVAD Legacy E L1/L2 GPS/GLONASS. Станция VLKK оснащена антенной Javad MarAnt+ и приемником JAVAD Legacy E L1/L2 GPS/GLO-

NASS. Текущая работа станций обслуживается сотрудниками организаций, на территории которых они установлены. Данные с GPS приемников поступают через Интернет в комплекс хранения и обработки астрономических данных ГАИШ МГУ.

Совокупность трех станций ГАИШ “Терскол” (TRSK), “Кисловодск” (KISL), “Владикавказ” (VLKK) и международной станции “Зеленчукская” (ZECK) покрывают обширную территорию Республик Кабардино-Балкарии, Карачаево-Черкесии и Северной Осетии-Алании и формируют региональную Северо-Кавказскую геодезическую сеть (СКГС). Также с 2010 г. на Кавказе активно развивается сеть станций GPS/ГЛОНАСС наблюдений Геофизической служба (ГС) РАН. В настоящее время в нее входит 4 станции. Таким образом, сформированная сеть позволяет решать региональные задачи по изучению основных закономерностей современных движений земной коры на Северном Кавказе.

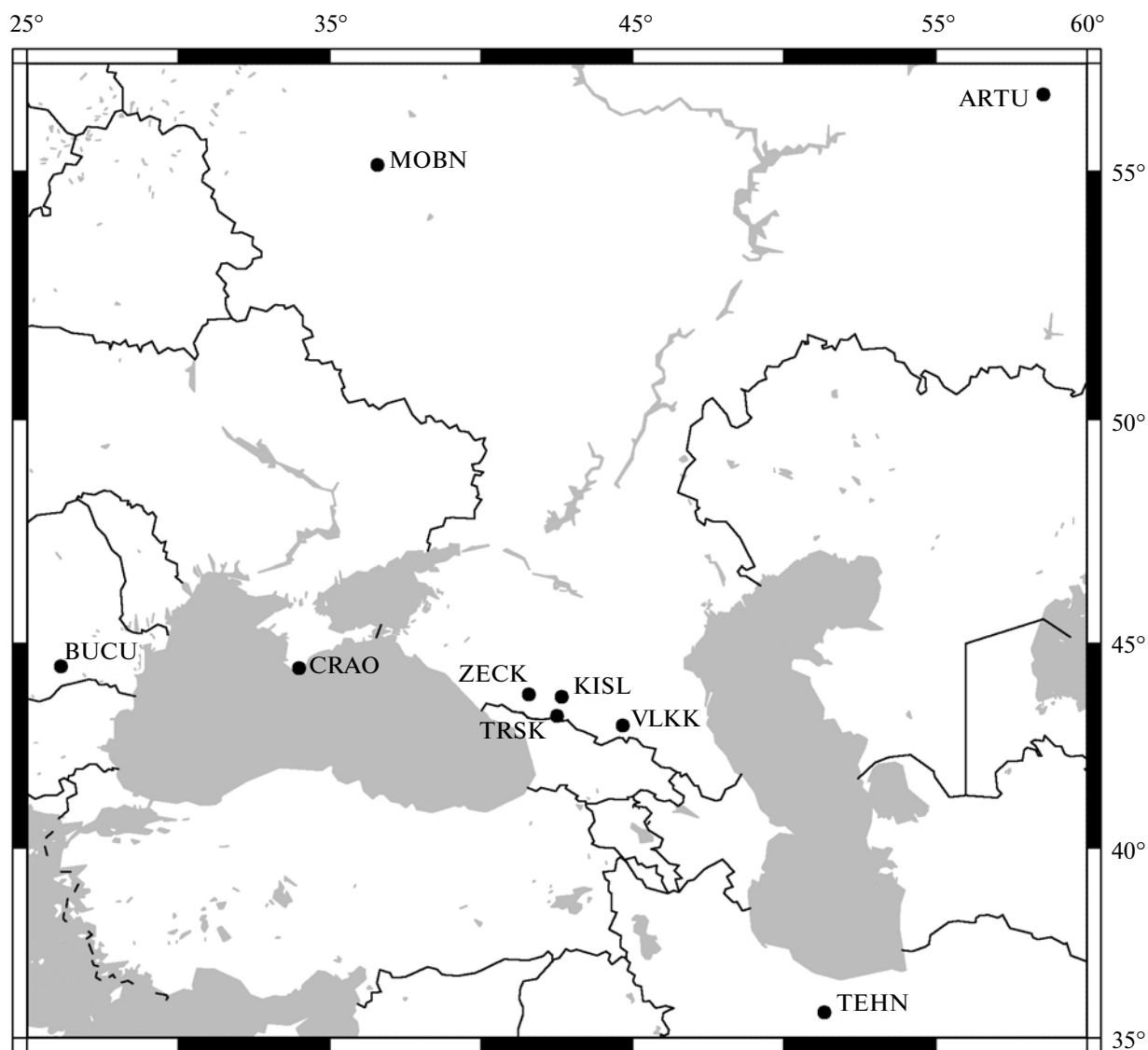
В настоящей работе мы представляем поле скоростей современных движений региона Северного склона Большого Кавказа, которое уточняет результаты, изложенные в [24].

## GPS НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Оценка скоростей современных движений Северного Кавказа строилась по результатам наблюдений на четырех стационарных GPS станциях Северо-Кавказской геодезической сети. Карта с положением станций показана на рис. 1.

В основу оценки скоростей положен анализ временных рядов координат GPS станций, вычисляемых из первичных данных, которые представляют собой наборы фазовых и кодовых измерений на двух частотах продолжительностью 24 часа с интервалом регистрации 30 с. Для оценки скоростей определяемых станций необходимо наличие в сети хотя бы одного опорного пункта, а желательнее нескольких. При этом в случае нескольких опорных пунктов необходимо учитывать их взаимное смещение. Поэтому к набору измерений на станциях KISL, TRSK, VLKK в данном исследовании добавлены данные шести близкорасположенных опорных станций сети IGS: ARTU (Арти, Урал), BUCU (Бухарест, Румыния), CRAO (Крым), MOBN (Обнинск, Московск. обл.) TERN (Тегеран, Иран) и ZECK (Зеленчукская, Северный Кавказ). Выбранные опорные станции с указанной кодировкой входят в реализацию международной земной отсчетной основы ITRF2008. Географическое положение опорных и наблюдаемых станций показано на рис. 1.

Обработка GPS данных выполнялась программным пакетом GAMIT/GLOBK [17–21] на комплексе хранения и обработки астрономических данных ГАИШ МГУ. Вычисленные времен-



**Рис. 1.** Карта постоянных GPS станций сети IGS (ARTU, BUCU, CRAO, MOBNA, TEHN, ZECK, см. пояснения в тексте) и станций ГАИШ МГУ на Северном Кавказе (KISL, TRSK, VLKK)

ные ряды координат станций KISL, TRSK, VLKK показаны на рис. 2–4.

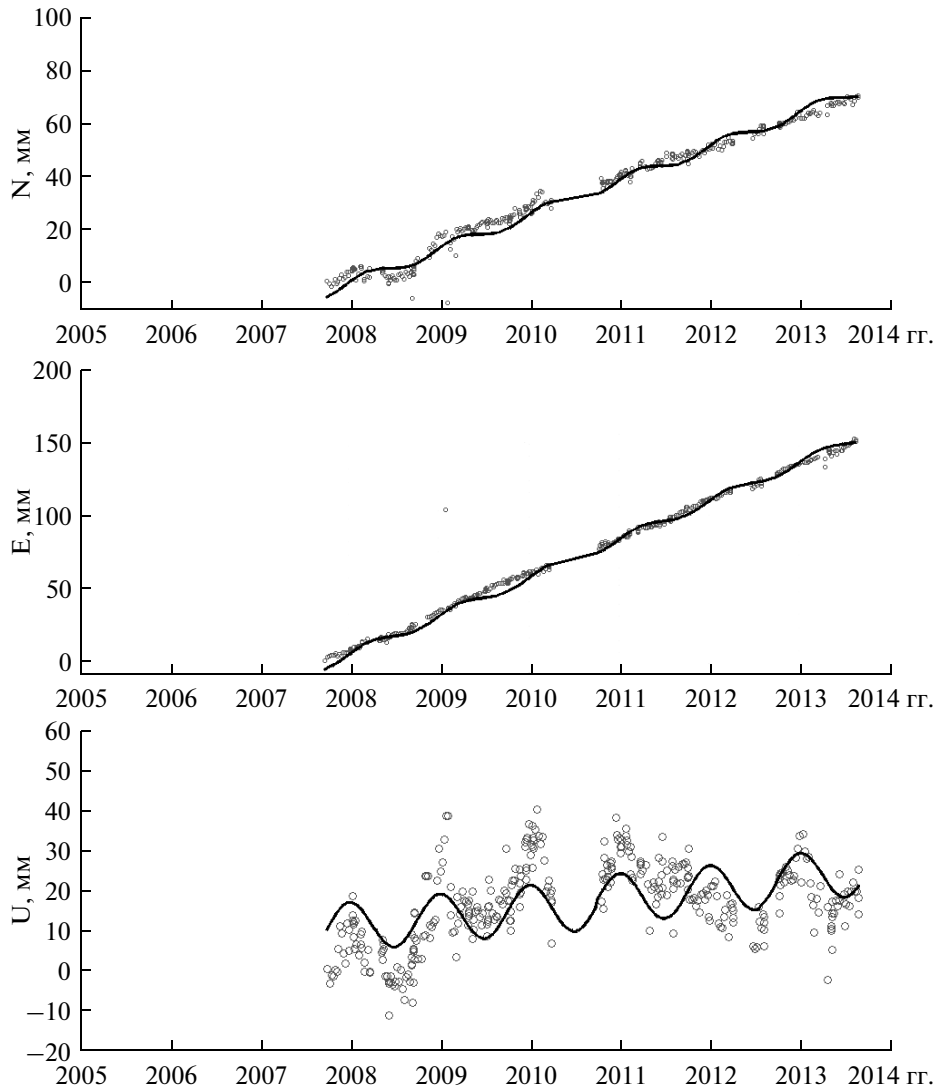
Оценки компонент скоростей и векторов горизонтальных движений GPS станций Северо-Кавказской региональной сети и опорных станций сети IGS, расположенных на Евразийской плите, приведены в табл. 1 и на рис. 5 (относительно системы ITRF2008) и в табл. 2 (относительно неподвижной Евразии).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изменения координат для станций региональной сети СКГС (TRSK, KISL, VLKK, ZECK) имеют схожий характер (см. рис. 2–4). Временные ря-

ды координат характеризуются сезонными вариациями, наиболее выраженными для вертикальных компонент. Точность определения координат изменяется в пределах 1–3 мм за сутки. Такой же точностью характеризуются координаты опорных станций сети IGS, используемых при анализе.

Характерным аспектом поля скоростей Северного Кавказа относительно ITRF2008 является быстрое горизонтальное смещение в северо-восточном направлении практически с одинаковыми скоростями, 26–28 мм/год (см. рис. 5, табл. 1). Подобным движением характеризуется и Крымский полуостров (CRAO). Опорные станции в центральных стабильных частях Евразийской плиты (ARTU и MOBNA) также движутся в



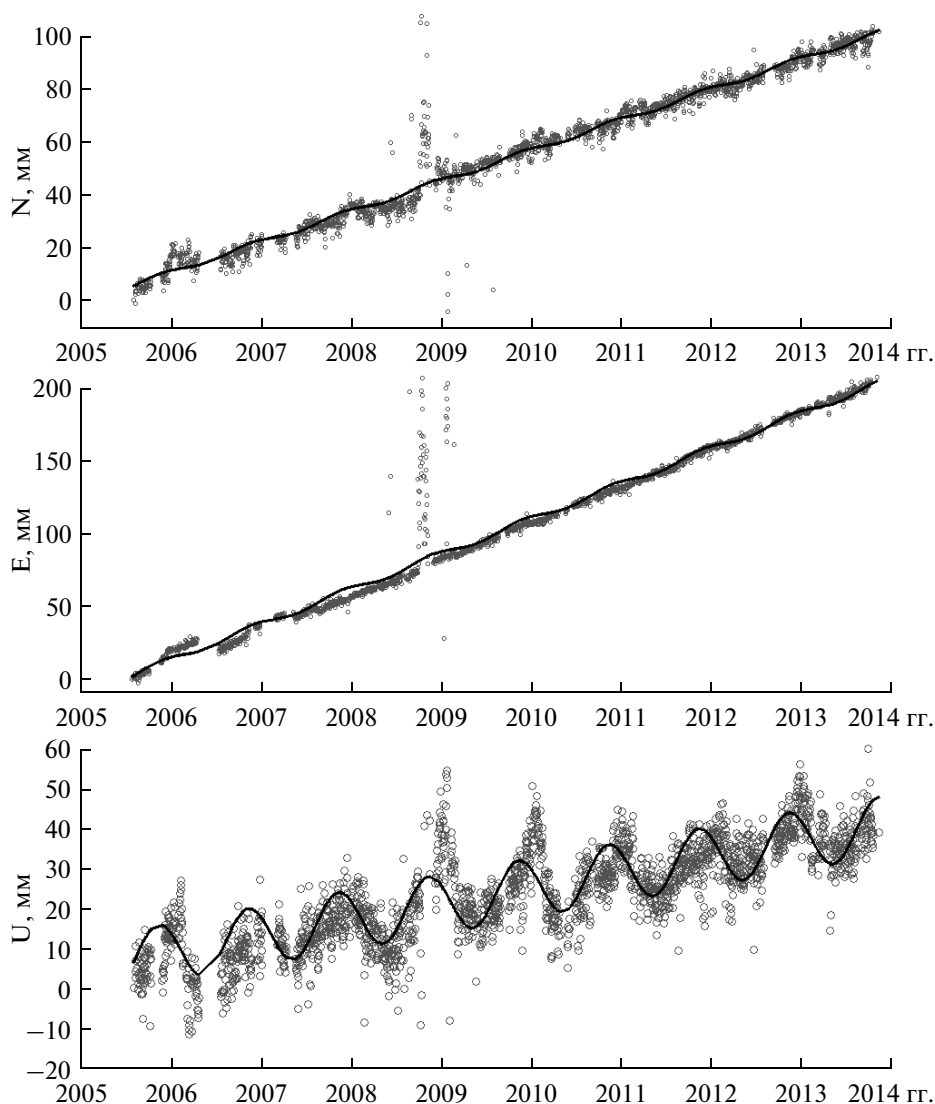
**Рис. 2.** Изменение координат станции Кисловодск (KISL). Компоненты: юг–север (N); запад–восток (E); вертикальный подъем (U)

северо-восточном направлении, однако скорость их несколько меньше, 24–25 мм/год. С такой же скоростью движется европейская станция BUCU (Бухарест). Наконец, скорость движения опорной станции Тегеран (TEHN) значительно превышает все остальные (34 мм/год).

Для кинематического анализа приведенных различий скоростей движение всех указанных станций соотнесено с движением Евразийской плиты в целом. Для определения параметров движения Евразийской плиты использован набор опорных станций по Северной Евразии, расположенных в стабильных платформенных областях Восточной Европы и Сибири. Опорные станции выбираются таким образом, что их скорости характеризуются взаимной согласованностью в рамках модели, описывающей мгновенное дви-

жение целостного недеформируемого сегмента сферической поверхности как вращение относительно общего полюса Эйлера. Условием такой согласованности является существование общего для всех пунктов вектора Эйлера, векторное произведение которого с радиусом-вектором пункта определяет скорость каждого пункта.

Движение опорных станций MOBН и ARTU, расположенных в Восточной Европе, закономерно соответствует кинематике Евразийской плиты (в пределах погрешностей измерений), так как эти станции входят в число опорных станций, определяющих ее стабильную внутреннюю часть. В то же время Северо-Кавказские станции, а также Крымская станция CRAO, характеризуются избыточными значениями скоростей 1–2 мм/год по отношению к расчетным значениям, вытекаю-



**Рис. 3.** Изменение координат станции Терскол (TRSK). Компоненты: юг–север (N); запад–восток (E); вертикальный подъем (U)

щим из принятой модели движения Евразии. Данные отличия, проявляющиеся в виде остаточных скоростей пунктов при трансформации из ITRF2008 в систему отсчета, связанную с неподвижной Евразией, приведены в табл. 2.

В целом, современное относительно более быстрое смещение Северного Кавказа обусловлено общим тектоническим движением Альпийско-Гималайского пояса относительно ITRF и Восточно-Европейской платформы. Станции ZECK и KISL располагаются в пределах Лабино-Малкинской тектонической зоны центрального сектора Большого Кавказа. Станция TRSK – в зоне Главного хребта Центрального Кавказа. Станция VLKK располагается в южной, предгорной части Осетинской впадины Восточного Предкавказья.

Выявленное общее сжатие Северного Кавказа является не только прямым следствием давления, оказываемого Аравийской плитой на Кавказский сегмент подвижного, тектонически активного Альпийско-Гималайского пояса, но и внутренними геодинамическими причинами: коровым и мантийным диапиризмом, молодым вулканизмом, альпийским орогенезом в пределах мегантиклинория Большого Кавказа [2, 9, 11–14, 22].

При этом избыточные горизонтальные движения в пограничной области Северного Кавказа относительно Евразийской и Скифской плит обуславливают повышенную сейсмическую и тектоническую активность этой переходной зоны. Проведенные геолого-геоморфологические исследования во Владикавказской зоне разломов по-

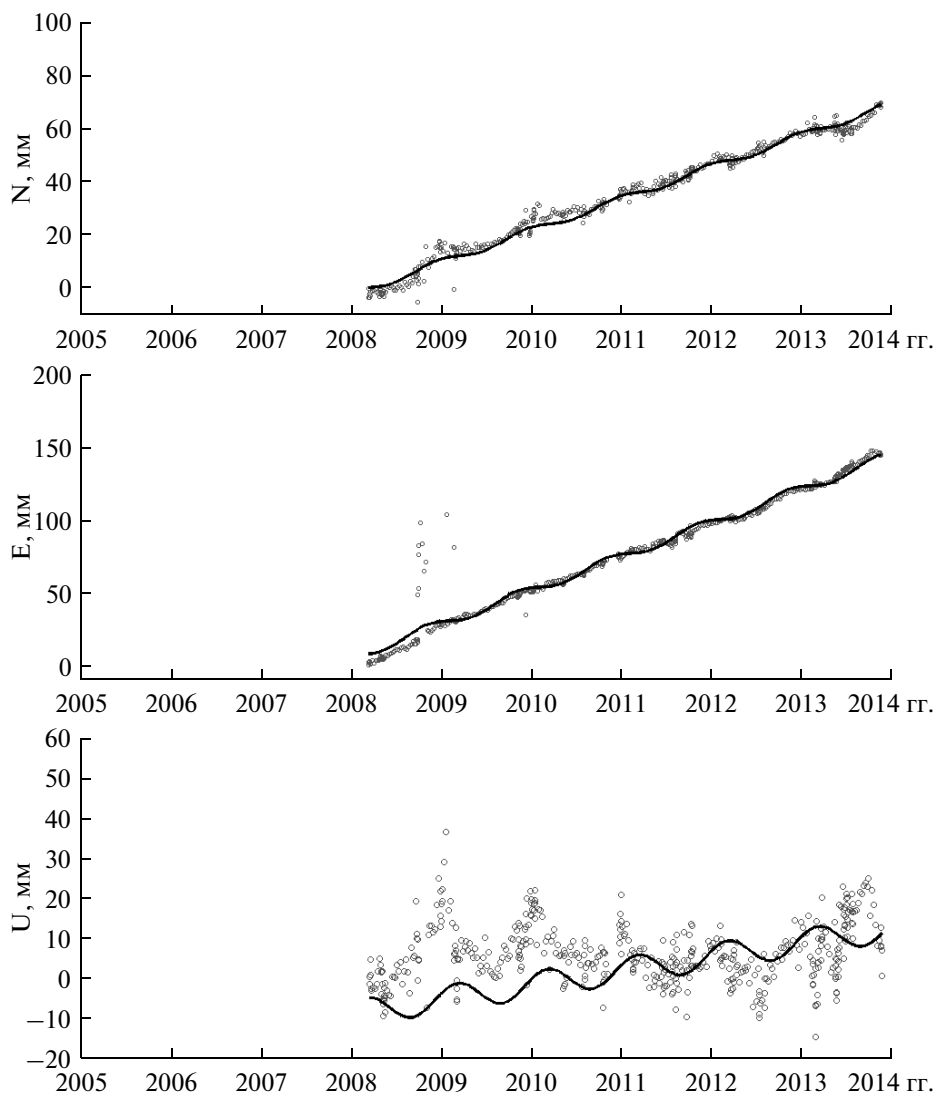


Рис. 4. Изменение координат станции Владикавказ (VLKK). Компоненты: юг–север (N); запад–восток (E); вертикальный подъем (U)

казали наличие значительных деформаций четвертичных надпойменных террас в долинах рек Терек, Ардон и др. [6, 8]. Обычно активные ветви разлома на поверхности демонстрируют крутое падение в северном направлении, под Осетинскую впадину, а взброшенным оказывается северное, предгорное крыло (рис. 6). По геофизическим данным [3] северная и южная ветви разлома при погружении в северном направлении приобретают на глубине форму листрического взброса, выполаживаясь на глубине 5–7 км практически до горизонтального положения. Именно в зоне этого разлома происходит, по-видимому, скрадывание скорости горизонтальных движений примерно на 1–2 мм/год.

Показательно, что на южном склоне Большого Кавказа в ходе геодинамических исследований в начале 90-х годов 20-го века с помощью GPS изме-

рений было установлено, что здесь имеют место горизонтальные смещения, ориентированные в южном направлении, от складчатой системы в сторону Грузинской глыбы. В соответствии с этими результатами косейсмическое смещение в очаге Рачинского землетрясения 1990 г. выглядело как пологий надвиг структур Южного склона в сторону Закавказского срединного массива [1, 10]. То есть и на северном, и на южном крыльях мегантиклинория имеют место активные разрывные нарушения, указывающие на общее сжатие складчатого сооружения и подтверждающие, кроме наличия внешнего воздействия, также реальность существования внутренних источников деформации.

Что касается современных вертикальных движений Северо-Кавказского региона в целом, можно отметить следующее (табл. 1). Невысокая равнин-

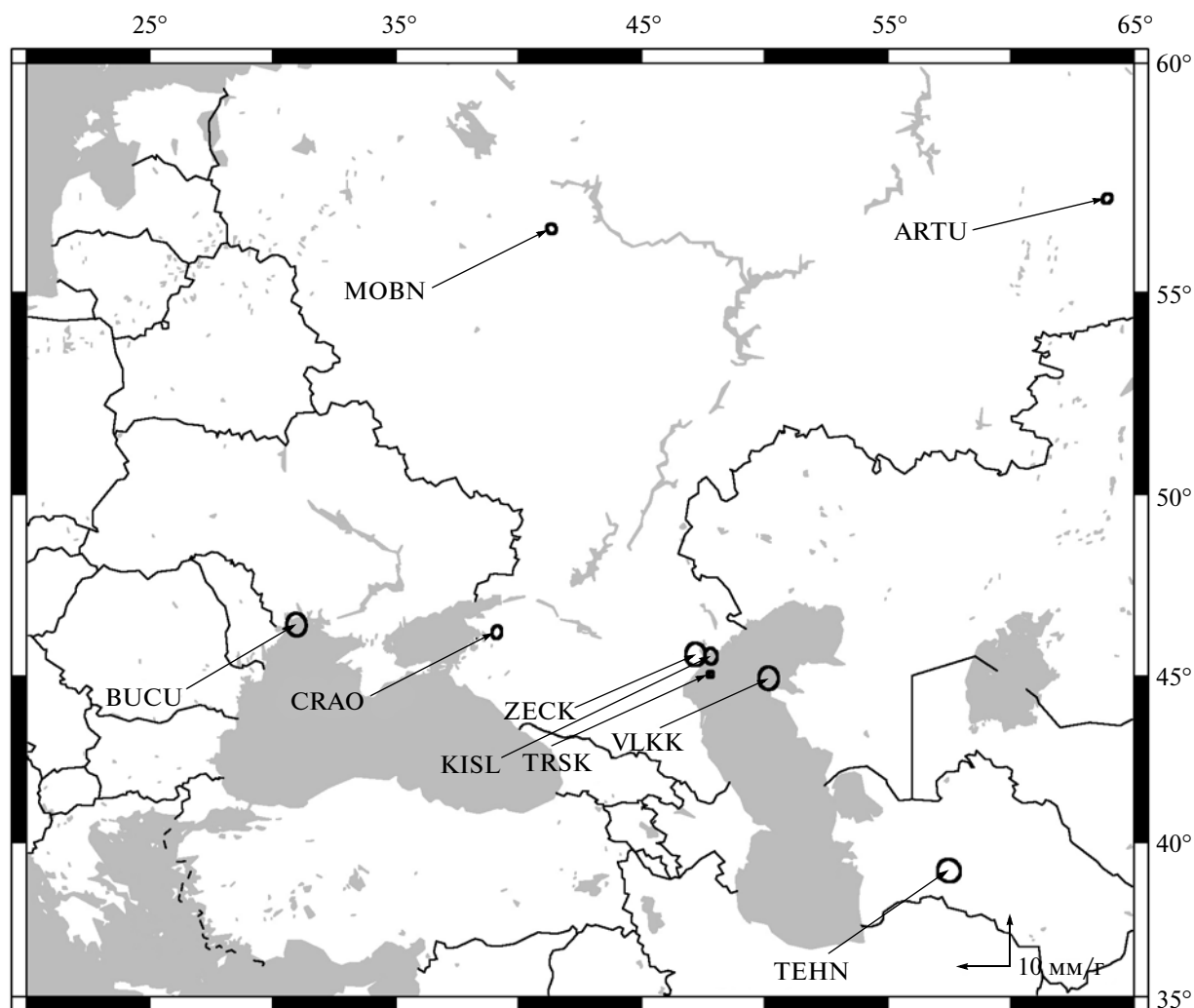


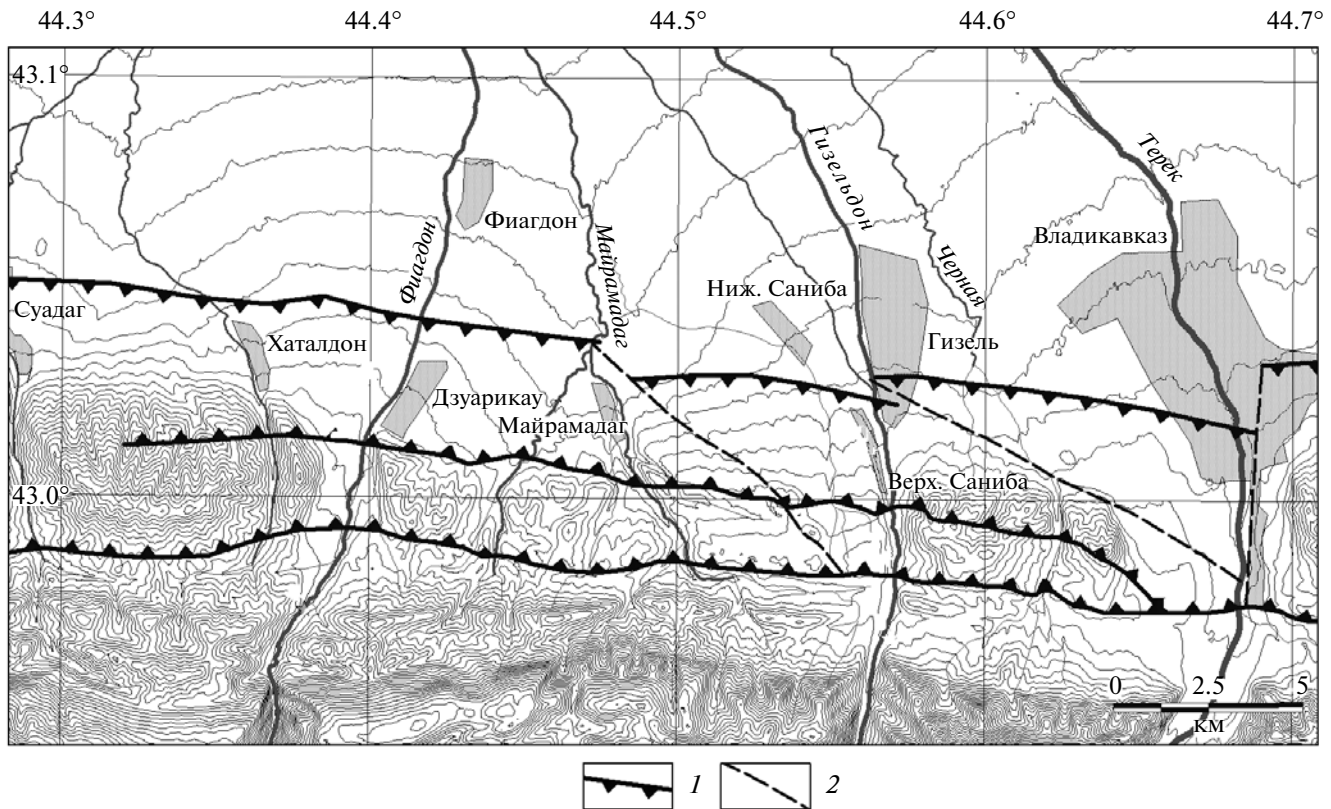
Рис. 5. Скорости горизонтальных смещений с эллипсами ошибок  $1\sigma$  GPS станций Северо-Кавказской региональной сети (KISL, TRSK, VLKK) и опорных станций сети IGS в системе относительности ITRF2008

ная часть Осетии (VLKK) характеризуется небольшими вертикальными движениями 2.5 мм/год. Наибольшую скорость подъема демонстрирует горная часть Северного Кавказа (станции KISL и

TRSK), порядка 3.5–4.5 мм/год. Наконец, северная часть северного склона Большого Кавказа (пункт “Зеленчукская”) имеет умеренный устойчивый подъем 2.9 мм/год. Оценки скорости подъема

Таблица 1. Скорости движений станций GPS Северо-Кавказской региональной сети (KISL, TRSK, VLKK) и опорных станций сети IGS, расположенных на Евразийской плите, в системе относительности ITRF2008.

Станции	Компоненты вектора скорости, мм/год			Вектор скорости, мм/год	Азимут, °
	Е (запад–восток)	N (юг–север)	U (вертикальный подъем)		
KISL	$23.84 \pm 0.39$	$11.83 \pm 0.49$	$3.55 \pm 1.53$	$26.61 \pm 0.43$	63.61
TRSK	$24.51 \pm 0.20$	$11.39 \pm 0.20$	$4.36 \pm 0.70$	$27.03 \pm 0.20$	65.08
VLKK	$25.39 \pm 0.60$	$12.09 \pm 0.70$	$2.49 \pm 2.20$	$28.12 \pm 0.65$	64.54
ARTU	$24.81 \pm 0.30$	$5.92 \pm 0.30$	$0.48 \pm 1.00$	$25.51 \pm 0.30$	76.58
BUCU	$22.15 \pm 0.50$	$12.93 \pm 0.50$	$4.41 \pm 2.00$	$25.65 \pm 0.50$	59.73
CRAO	$23.96 \pm 0.20$	$11.64 \pm 0.20$	$1.73 \pm 0.70$	$26.64 \pm 0.20$	64.09
MOBN	$22.05 \pm 0.30$	$11.02 \pm 0.30$	$0.39 \pm 1.10$	$24.65 \pm 0.30$	63.45
TEHN	$27.87 \pm 0.50$	$19.97 \pm 0.50$	$0.59 \pm 2.00$	$34.29 \pm 0.50$	54.38
ZECK	$25.75 \pm 0.40$	$11.82 \pm 0.50$	$2.89 \pm 1.70$	$28.33 \pm 0.45$	65.34



**Рис. 6.** Схема расположения ветвей Владикавказской разломной зоны. Горизонтالي рельефа проведены через 30 м  
 1 – активные взбросы (бергштрихи направлены в сторону поднятого крыла); 2 – предположительно активные разломы (сдвиги)

ема для этой станции, полученные гравиметрическим и геодезическим методами, совпадают в пределах ошибок [25].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценки скоростей, полученные в ходе проведенных геодезических работ, показывают, что есть общее небольшое сжатие Северного Кавказа со скоростью порядка 1–2 мм/год. Данный результат подтверждает существующую точку зрения, что источником деформирования Северного Кавказа является приближение в суб-меридио-

нальном направлении Аравийской литосферной плиты к смежной окраине Восточно-Европейской части Евразийской литосферной плиты, что было установлено в результате предыдущих GPS измерений [23, 27]. Эта концепция сближения предполагает, что в результате кавказский сегмент Альпийско-Гималайского подвижного пояса сжимается, слои осадочных и вулканических пород сминаются в складки, блоки основания испытывают разнонаправленные смещения, а верхние горизонты коры нарушаются взбросами и надвидами. Для выявления более детальной геодинамической картины строения региона требуется

**Таблица 2.** Скорости перемещений станций GPS Северо-Кавказской региональной сети в относительно фиксированной Евразийской плиты.

Станции	Компоненты вектора скорости, мм/год		Вектор скорости, мм/год	Азимут, °
	Е (запад–восток)	Н (юг–север)		
KISL	$-1.73 \pm 0.90$	$1.55 \pm 0.82$	$2.32 \pm 0.86$	-48.14
TRSK	$-0.75 \pm 0.80$	$0.87 \pm 0.63$	$1.15 \pm 0.72$	-40.76
VLKK	$-0.24 \pm 0.83$	$2.09 \pm 0.79$	$2.10 \pm 0.81$	-6.55
ZECK	$0.52 \pm 0.75$	$0.86 \pm 0.50$	$1.00 \pm 0.64$	31.16



развитие более плотной геодезической сети, позволяющей отслеживать не только крупномасштабные горизонтальные и вертикальные движения региона, но и реализовывать региональный уровень наблюдений.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 12-05-00475 и Программы № 4 Президиума РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арефьев С.С., Рогожин Е.А., Быкова В.В., Дорбат К.* Глубинная структура очаговой зоны Рачинского землетрясения по сейсмотомографическим данным // *Физика Земли*. 2006. № 1. С. 30–44.
2. *Белюсов В.В.* Большой Кавказ как тектоническая лаборатория // *Проблемы геодинамики Кавказа*. М.: Наука, 1982. С. 9–13.
3. *Горбатиков А.В., Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Ларин Н.В.* Строение зоны Владикавказского разлома по результатам изучения комплексом геолого-геофизических методов // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2010. Т. 37. № 3. С. 36–44.
4. *Копп М.Л.* Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М.: Наука, 2004. 340 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 552).
5. *Копп М.Л.* Новейшие деформации Южного Урала и Мугоджар и их вероятное происхождение // *Геотектоника*. 2005. № 5. С. 36–61.
6. *Короновский Н.В., Демина Л.И.* Коллизионный этап развития Кавказского сектора Альпийского складчатого пояса: геодинамика и магматизм // *Геотектоника*. 1999. № 2. С. 17–34.
7. *Леонов Ю.Г., Гущенко О.И., Копп М.Л., Расцветаев Л.М.* Взаимосвязь позднекайнозойских напряжений и деформаций в Кавказском секторе Альпийского пояса и в его северном платформенном обрамлении // *Геотектоника*. 2001. № 1. С. 36–59.
8. *Милановский Е.Е.* Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.
9. *Павленкова Г.А.* Строение земной коры Кавказа по профилям ГСЗ Степное–Бакуриани и Волгоград–Нахичивань (результаты переинтерпретации первичных данных) // *Физика Земли*. 2012. № 5. С. 16–25.
10. *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., Hamburger M., King R., Reilinger R.* Изучение кинематики Кавказского региона с использованием GSP технологии // *Физика Земли*. 1997. № 6. С. 68–75.
11. *Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Заалишвили В.Б., Степанова М.Ю., Зайцева Н.В., Харазова Ю.В.* Новые данные о глубинном строении, тектонике и геодинамике Большого Кавказа // *Материалы 46 (XLVI) Тектонического совещания “Тектоника складчатых поясов Евразии: сходство, различие, характерные черты новейшего горообразования, региональные обобщения”*. М.: ГЕОС, 2014. С. 125–130.
12. *Шевченко В.И., Гусев Т.В., Мишин А.В., Прилепин М.Т., Рейлинджер Р.Э., Лукк А.Я., 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.
13. *Шемпелев А.Г.* Результаты глубинных геофизических исследований вдоль Геналдонского профиля // *Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа. Труды международной н.-п. конференции, Владикавказ, 20–22 сентября 2007*. Владикавказ: ИЦ РАН, 2008. С. 457–463.
14. *Шолло В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А.* Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука, 1993. 192 с.
15. *Becker M., Zerbini S., Bakerc T., Bürkid B., Galanis 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. Vol. 34. Is. 1–2. P. 5–35. DOI: 10.1016/S0921-8181(02)00103-0.
16. *Conrad C.P., Lithgow-Bertelloni C.* The temporal evolution of plate driving forces: Importance of “slab suction” versus “slab pull” during the Cenozoic // *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. Is. B10407. DOI: 10.1029/2004JB002991.
17. *Dong D.-N., Herring T., King R.W.* Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data // *J. Geod.* 1998. № 72. P. 200–214.
18. *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., Shen Z.-K.* Measurement of the velocity field in central and southern California // *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98. P. 21667–21712.
19. *Herring T.A.* GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program Version 10.1 Internal Memorandum, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2003.
20. *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.
21. *King R.W., Bock Y.* Documentation for the GAMIT analysis software, release 9.7, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1998.
22. *Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V.* Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography // *Solid Earth*. 2012. № 3. P. 327–337.
23. *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 // *J. Geophys. Res.*

2000. Vol. 105. Is. B3. P. 5695–5719. DOI: 10.1029/1999JB900351.
24. Milyukov V., Kopaev A., Zharov V., Mironov A., Myasnikov A., Kaufman M., Duev D. Monitoring crustal deformations in the Northern Caucasus using a high precision long base laser strainmeter and the GPS/GLO-NASS network // *J. Geod.* 2010. № 49. P. 216–223. DOI: 10.1016/j.jog.2009.10.003.
25. Milyukov V.K., Yushkin V.D., Kopaev A.V., Mironov A.P., Dem'yanov G.V., Sermyagin R.A., Basmanov A.V., Popad'ev V.V., Nasretdinov I.F., Zaalishvili V.B., Kanukov A., Dzeranov B. Monitoring Current Vertical Movements of the Northern Caucasus by Absolute and Relative Gravimetry // *Measurement Techniques*. 2014. Vol. 56. Is. 10. P. 1105–1110. DOI: 10.1007/s11018-014-0338-y.
26. 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 // *Geophys. Res. Lett.* 1997. Vol. 24. № 14. P. 1815–1818.
27. 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., Geburan Karam. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. Is. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.
28. Tapponnier P., Zhiqin X., Roger F., Meyer B., Arnaud N., Wittlinger G., Jingsui Y. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau // *Science*. 2001. Vol. 294. Is. 5547. P. 1671–1677. DOI: 10.1126/science.105978.
29. Thatcher W. GPS constraints on the kinematics of continental deformation // *International Geology Review*. 2003. Vol. 45. P. 191–212. DOI: 10.2747/0020-6814.45.3.191.
30. Wright T.J., Parsons B., England P.C., Fielding E.J. InSAR observations of low slip rates on the major faults of western Tibet // *Science*. 2004. Vol. 305. Is. 5681. P. 236–239. DOI: 10.1126/science.1096388.

Рецензенты: *Н.В. Короновский, В.Г. Трифонов*

## Velocities of Recent Movements of the Northern Caucasus Estimated from GPS Observations

V. K. Milyukov<sup>a</sup>, A. P. Mironov<sup>a</sup>, E. A. Rogozhin<sup>b</sup>, and G. M. Steblov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Moscow State University, Sternberg State Astronomical Institute, Universitetskii pr. 13, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: vmilyukov@yandex.ru*

<sup>b</sup> *Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Bol'shaya Gruzinskaya ul. 10, Moscow, 123995 Russia*

Received May 6, 2014

**Abstract**—The velocity field of the Northern Caucasus based on the results of observations at the Northern Caucasus Deformation Array (NCDA) stations is represented in the paper. Appreciable horizontal displacement to the northeast with velocity of 26–28 mm/yr relative to the International Terrestrial Reference System (ITRF2008) is established. General compression of the region at a rate of 1–2 mm/yr relative to immobile Europe is a source of the contemporary geological and seismic activity in the boundary zone between the Caucasus and the East European Platform.

**Keywords:** contemporary movements of the Earth's crust, satellite geodesy