

Геодинамика территории Владикавказа по данным ГНСС-наблюдений на Осетинском геодинамическом полигоне

А.П. Миронов,^{1,2,*} В.К. Милюков,^{1,2} А.Н. Овсяченко,³ Х.М. Хубаев,² С.О. Дзебоев²

¹ Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ)

Россия, 119234, Москва, Университетский проспект, д. 13

² Владикавказский научный центр Российской академии наук (ВНЦ РАН)

Россия, Республика Северная Осетия–Алания, 363110, Пригородный район, с. Михайловское, ул. Вильямса, д. 1

³ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

Россия 123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1

(Поступила в редакцию 18.09.2025; после доработки 28.09.2025; подписана в печать 21.11.2025)

Представлен анализ современной геодинамической обстановки территории Владикавказа, выполненный по данным многолетних ГНСС наблюдений на постоянных станциях и полевых пунктах Осетинского геодинамической полигона. Оценки скоростей выполнены в двух системах отсчета: глобальной ITRF и региональной ITRF2014_EURA, относительно неподвижной Евразии. В системе ITRF движение региона согласуется с общим движением всего Большого Кавказа в северо-восточном направлении со скоростью 27–30 мм/год. Результаты профилирования скоростей в региональной системе отсчета выявили ряд разнонаправленных кинематических особенностей, определяющих современный геодинамический режим этого региона. Полученные результаты, а также результаты сейсмологических исследований свидетельствуют о том, что город Владикавказ находится в зоне относительно активных геодинамических процессов.

PACS: 91.10.Kg; 91.30.Rx УДК: 551.24

Ключевые слова: геодинамика, современные движения земной коры, спутниковая геодезия, глобальные навигационные спутниковые системы, ГНСС, Северный Кавказ, Осетия, Владикавказ.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.81.2610802](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.81.2610802)

1. ВВЕДЕНИЕ

Осетинский сектор, в том числе город Владикавказ, расположен в области максимального сужения всех тектонических зон Большого Кавказа. Наиболее резко региональная граница между Большим Кавказом и Предкавказским прогибом проявлена именно в Северной Осетии, где представлена зоной Владикавказского глубинного разлома, демонстрирующего яркие признаки голоценовых тектонических смещений [1–5].

Зона Владикавказского разлома отделяет горное сооружение Большого Кавказа от Осетинской впадины Терско-Каспийского передового прогиба, смещающая поверхность фундамента на 5–6 км [6]. В кайнозойских слоях разлом фундамента представляет собой крупнейшую флексурно-разрывную зону с крутым (до вертикального) залеганием смыкающего крыла в палеогене и миоцене и более пологим в плиоцен-четвертичных отложениях [7].

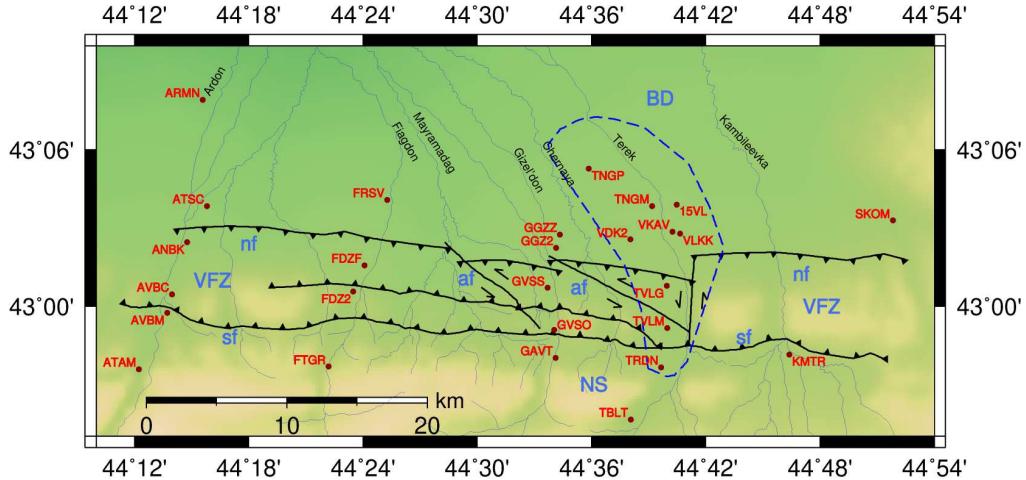
Осетинский сектор характеризуется высоким сейсмическим потенциалом. Подтверждением тому являются сильнейшие землетрясения. В 1991 г. на южном склоне рассматриваемого сектора Большого Кавказа произошло Рачинское землетрясение,

ставшее сильнейшим за инструментальный период наблюдений. Землетрясение было очень хорошо изучено с сейсмологической [8] и сейсмотектонической [9–12] точек зрения, что позволило охарактеризовать строение очага и выявить породившие его геологические структуры. Как показывают последние исследования, в силу наличия развитой разломной сети и активной геодинамики, сильные и катастрофические землетрясения в регионе происходили повсеместно и вызывали серьёзные последствия [13–15].

С этой точки зрения особый интерес представляет наиболее контрастная геологическая структура района: граница Предкавказского прогиба и Большого Кавказа, представленная Владикавказским разломом. В зоне Владикавказского разлома выявлен потенциальный сейсмический очаг с $M_{max} = 6.4 – 7.1$ [16, 17]. Этот очаг расположен в густонаселенном районе с городами Владикавказ, Алагир и другими крупными населенными пунктами. В то же время специальных сейсмотектонических исследований, позволяющих проверить расчетные оценки, ранее здесь не проводилось.

В 2010 г. в регионе Северной Осетии были проведены работы по сейсмическому профилированию методом низкочастотного микросейсмического зондирования (ММЗ) [18]. Измерения ММЗ проводились по двум профилям вдоль рек Тerek и Ардон. Применение метода микросейсмического зондиро-

* E-mail:almir@physics.msu.ru



GMD 2025 Sep 16 18:36:08

Рис. 1. Карта положения ветвей Владикавказской разломной зоны [3] и ГНСС пунктов Осетинского геодинамического полигона. Обозначения на карте: BD — Бесланская депрессия; VFZ — Владикавказская разломная зона; NS — Северный склон Большого Кавказа; nf, sf — северная, южная ветви разломной зоны — активные взбросы (бергштрихи направлены в сторону поднятого крыла); af — предположительно активные разломы (сдвиги). Синей пунктирной линией обозначена исследуемая территория Владикавказа

вания позволило проследить строение выявленных ранее [19–21] и изученных на поверхности геологогеоморфологическими методами [3] ветвей Владикавказской разломной зоны и по глубине, и по простирианию, т.е. составить трехмерное представление о строении исследуемой системы тектонических нарушений [1, 3].

Деформации, выявленные при геологическом картировании, позволяют полагать, что в прошлом все ветви Владикавказской разломной зоны испытывали импульсные обновления, причиной которых, скорее всего, были землетрясения. По всей видимости, помимо сейморазрывов, при этом образовались и крупные блоковые оползни. Выразительные деформации молодых отложений, выявленные при геологическом картировании, и отчетливое проявление Владикавказского разлома на глубине позволяют уверенно считать его крупной сейсмогенерирующей структурой [1, 3]. Мониторинг современных движений земной коры в зоне Владикавказского разлома и изучение его глубинного строения представляются весьма актуальными и интересными задачами.

В связи с этим Осетинский геодинамический полигон, созданный ВНЦ РАН и ГАИШ МГУ и действующий с 2010 г. [22, 23] в 2014–2015 гг., был дополнен 23 ГНСС-пунктами, сгруппированными в 4 профиля, расположенными вдоль рек Ардон, Фиагдон, Гизельдон, Тerek, полностью перекрывающими территорию Владикавказской разломной зоны [24–26] (рис. 1). В настоящее время Осетинский геодинамический полигон состоит из 59 пунктов периодически-повторных наблюдений и 8 станций непрерывных наблюдений, созданных непосредственно ВНЦ РАН или с его участием. Результаты совместной обработки всех ГНСС стан-

ций и полевых пунктов Осетинского геодинамического полигона, в том числе и пунктов в зоне Владикавказского разлома, показали [27], что деформационный режим северной части Осетинского сектора отличается от такого же в южной части. Северный склон зоны Главного Кавказского хребта и предгорный прогиб, включающий Владикавказскую разломную зону, находятся в условиях сжатия с умеренной интенсивностью. Это согласуется с результатами проводимых ранее исследований. На северном склоне и восточном крыле Владикавказской разломной зоны преобладает север-северо-западная ориентация осей сжатия–растяжения тензора скорости деформаций. На западном крыле Владикавказской разломной зоны происходит левый поворот (против часовой стрелки) ориентации осей сжатия–растяжения тензора скорости деформаций близко к 90°. В то же время анализ распределения эпицентров землетрясений показал, что в настоящее время в центральной и восточной частях Владикавказского разлома его северная ветвь асейсмична. Данная геодинамическая специфика свидетельствует о высокой степени сейсмического потенциала Владикавказской разломной зоны.

Изучаемая территория Владикавказа с точки зрения региональных морфоструктур охватывает с севера Бесланскую депрессию, на юге пересекает Владикавказскую разломную зону именно в его восточной части, которая, как отмечено выше, в настоящее время асейсмична и оканчивается на северном склоне Большого Кавказа (рис. 1). Цель нашей работы — получить детальные оценки современной геодинамической активности территории Владикавказа по данным многолетних региональных ГНСС наблюдений.

2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование кинематики и геодинамического режима территории города Владикавказа основывается на анализе временных рядов положений ГНСС станций и пунктов. Исходные данные представляют собой наборы фазовых и кодовых измерений на двух частотах продолжительностью 24 ч с интервалом регистрации 30 с.

Для оценки координат определяемых ГНСС-станций и пунктов проводится обработка измерений в дифференциальном режиме: положение определяемых пунктов вычисляется относительно 60 базовых станций IGS (Международная ГНСС-служба, <https://igs.org/>), включенных в Международную опорную земную систему отсчёта (ITRF) [28], покрывающих полусферу земной поверхности, в центре которой расположен исследуемый регион. Определяемыми являются расположенные на территории Владикавказа коммерческие станции: 15VL (Геостройизыскания, <https://www.gsi.ru/>), VDK2 (Южгеосеть, <https://geosety.net/>), VKAV (ПРИН, <https://www.prin.ru/>), научная станция VLKK (ГАИШ МГУ, ВНЦ РАН) и полевые пункты Осетинского геодинамического полигона ВНЦ РАН TNGP, TNGM, TVLG, TVLM, TRDN, на которых многократно проведены периодически-повторные измерения. Пространственное расположение ГНСС пунктов и станций представлено на карте на рис. 1.

На первом этапе обработки осуществляется совместное уравнивание в дифференциальном режиме фазовых измерений, полученных на опорных и определяемых станциях и пунктах, с целью разрешения целочисленных фазовых неопределенностей и внесения многочисленных поправок, уменьшающих погрешности измерений. При обработке учитываются наиболее существенные искажающие факторы:

1. возмущения орбит спутников, включая неконсервативные воздействия, рассогласование опорных частот спутниковой передающей и наземной приемной аппаратуры;
2. целочисленные неопределенности фазовых отсчетов;
3. тропосферная и ионосферная задержки распространения сигнала;
4. параметры связи инерциальной и земной систем координат вследствие неравномерности вращения Земли, нутации и прецессии полюса;
5. приливные возмущения земной поверхности.

На втором этапе обработки включение результатов измерений на опорных станциях IGS в первичное уравнивание позволяет выполнить совместное взвешенное уравнивание полученных первичных оценок с аналогичными результатами уравнивания тех-

же опорных станций в составе всей мировой сети IGS [29–31].

Для анализа временных рядов высокоточных координат станций $y(t_i)$ используется калмановская фильтрация с регрессионной моделью вида (1):

$$\begin{aligned} y(t_i) = & a + b t_i + c \sin(2\pi t_i) + \\ & + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) + \\ & + \sum_{k=1}^m g_{(i,k)} H(t - t_i), \quad (1) \end{aligned}$$

в которой учитывается линейная зависимость (a, b) ; сезонные составляющие: годовые — (c, d) , полугодовые — (e, f) ; и скачкообразные изменения местоположения станции (H — ступенчатая функция Хевисайда) [32–35]. На рис. 2 представлен ряд суточных оценок топоцентрических координат станции VLKK в ITRF2014 за период с конца 2011 г. по конец 2024 г. Данный временной ряд обработан фильтром Калмана с регрессионной моделью вида (1), в результате чего получены оценки компонент скорости смещения станции.

В случае периодически-повторных измерений на полевых пунктах с перерывами между эпохами измерений в один год регрессионная модель (1) является избыточной, так как оценить сезонные составляющие и скачкообразные изменения положений пунктов не представляется возможным. В качестве иллюстрации на рис. 3 представлены топоцентрические координаты полевого пункта TRDN периодически-повторных ГНСС измерений. Основной учёт изменения положения пунктов осуществляется из уравнивания полевых измерений относительно близко расположенных базовых станций и аппроксимация приращений координат линейной регрессией, что, в свою очередь, снижает точность определения положения пункта и скорости его смещения относительно непрерывных измерений на ГНСС-станциях. В регионе исследований для полевых пунктов такими близкорасположенными базовыми являются многолетние научные региональные ГНСС-станции ГАИШ МГУ и ВНЦ РАН — VLKK, KNII; станции ФИЦ ЕГС РАН — PRTN, VLKZ, LATZ; станции ВНЦ РАН и ФИЦ ЕГС РАН — ARD2, KAMT.

В результате проведённой обработки ГНСС измерений получены решения в системе отсчёта ITRF2014 и в системе отсчёта, связанной с неподвижной Евразией ITRF2014_EURA. Решения содержат временные ряды приращений координат (рис. 2, 3) и скорости смещений опорных и определяемых станций и пунктов в глобальной ITRF2014 и региональной ITRF2014_EURA системах (табл. 1, рис. 4, 5). Обработка ГНСС измерений осуществлялась пакетом программ GAMIT/GLOBK, предназначенным для высокоточных геодезических определений по радионавигационным спутниковым измерениям [30, 31] на комплексе хранения и обработки астрономических данных ГАИШ МГУ (<https://istina.msu.ru/equipment/card/9351754/>).

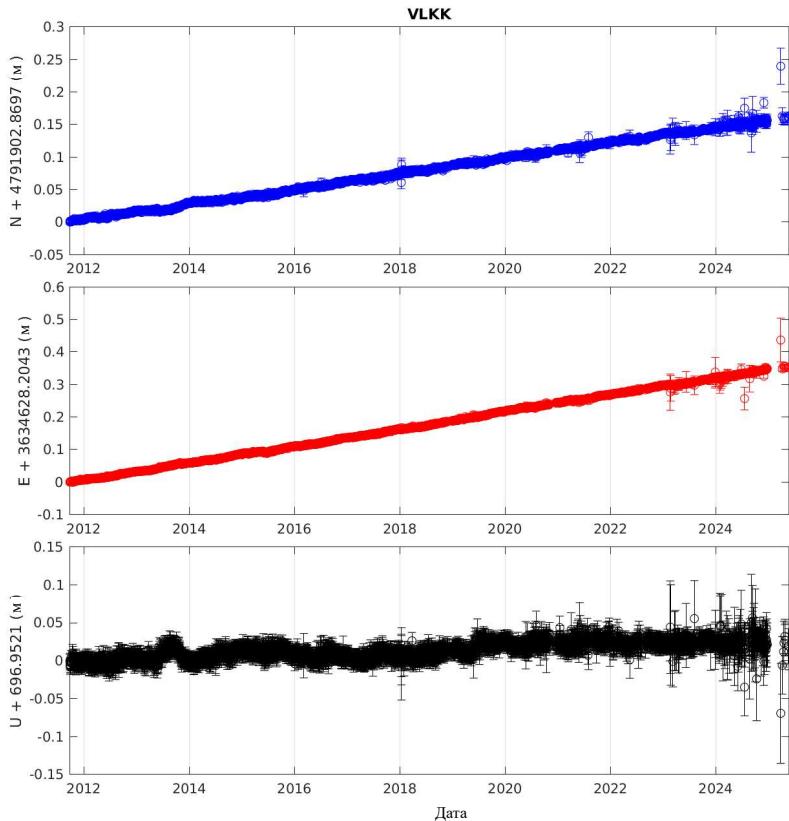


Рис. 2. Временные ряды вычисленных значений приращений топоцентрических координат ГНСС станции VLKK в ITRF2014 за период 2011–2024 гг. N, E, U — северная, восточная и вертикальная компоненты топоцентрических координат станции

Таблица 1. Скорости смещений ГНСС-станций и пунктов в ITRF2014 (горизонтальная скорость, азимут и вертикальная скорость) и в ITRF2014_EURA (горизонтальная скорость и азимут). Азимут отсчитывается от направления на Север, положительный — по часовой стрелке, отрицательный — против часовой стрелки

CODE	ITRF2014			ITRF2014_EURA	
	V, мм/г.	Azimuth, °	Up, мм/г.	V, мм/г.	Azimuth, °
1 TNGP	28.77±0.87	65.72	0.46±1.49	1.95±0.87	-3.23
2 TNGM	29.70±0.87	66.57	10.21±1.66	2.14±0.87	25.13
3 15VL	28.88±1.04	66.36	0.98±1.09	1.72±1.03	3.66
4 VLKK	28.52±0.56	65.60	2.11±0.58	1.94±0.56	-11.31
5 VKAV	27.78±1.00	65.59	0.87±1.07	1.93±1.00	-33.61
6 VDK2	30.05±1.54	62.23	-0.80±1.84	4.13±1.54	3.06
7 TVLG	28.85±0.84	63.21	-1.18±1.34	3.19±0.84	-10.85
8 TVLM	28.45±0.84	65.54	-0.56±1.32	1.96±0.84	-13.54
9 TRDN	29.30±0.82	65.59	7.46±1.18	2.26±0.82	8.13

При изучении региональной геодинамики существует общепринятый метод сопоставления ГНСС измерений с глубинными геофизическими, структурно-геологическими и морфотектоническими разрезами. При этом для получения системной оценки кинематики региона используют скоростное профилирование [36–42], которое состоит в следующем. Положение спутниково-геодезических

станций описывают в соответствии с местными тектоническими структурами. Исходные горизонтальные скорости смещений станций в региональной системе отсчета (ITRF2014_EURA) проецируют на выбранный профиль. В результате чего формируется кинематическая карта с сонаправленными и перпендикулярными компонентами скоростей на заданное направление.

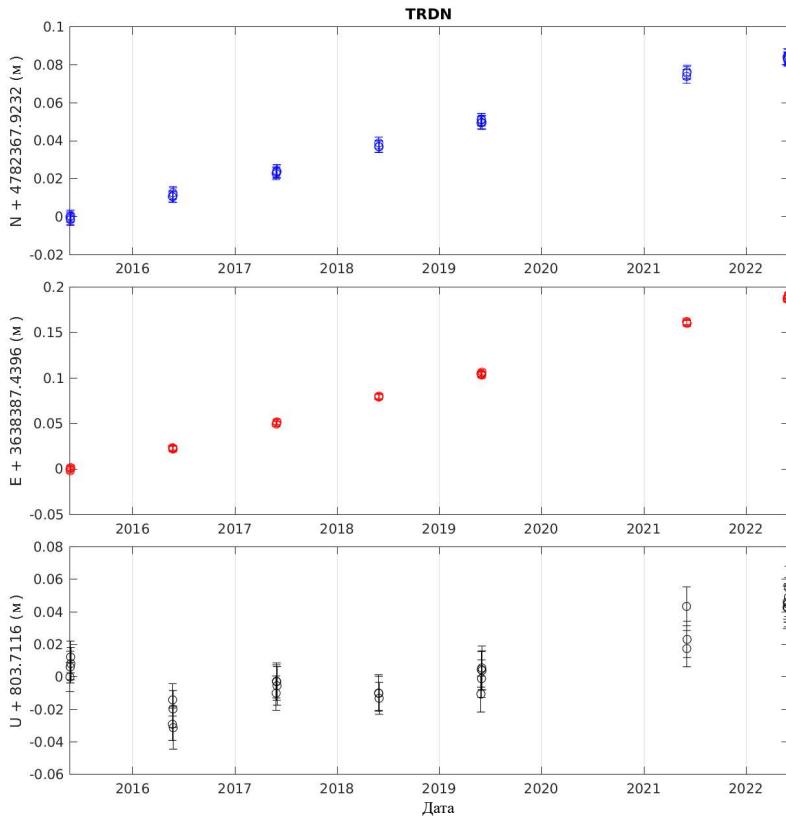


Рис. 3. Временные ряды вычисленных значений приращений топоцентрических координат ГНСС-пункта TRDN в ITRF2014 за период 2012–2022 гг. N, E, U — северная, восточная и вертикальная компоненты топоцентрических координат станции

Таблица 2. Компоненты проекции скоростей на профиль А–А' с азимутом 5.05° : вдоль профиля, поперек и вертикальные. Положительные скорости вдоль профиля имеют северную ориентацию, положительные поперек — восточную. Представлены остаточные скорости, полученные после вычитания линейной регрессии

	CODE	Dst, км	Along, мм/г.	Cross, мм/г.	Upift, мм/г.
1	TRDN	0.41	0.15 ± 0.82	-0.48 ± 0.82	5.38 ± 0.82
2	TVLM	3.24	-0.24 ± 0.84	0.27 ± 0.84	-2.64 ± 0.84
3	TVLG	6.24	0.96 ± 0.84	0.52 ± 0.84	-3.26 ± 0.84
4	VDK2	9.30	2.02 ± 1.54	-0.21 ± 1.54	-2.88 ± 1.54
5	VLKK	10.02	-0.25 ± 0.56	0.19 ± 0.56	0.03 ± 0.56
6	VKAV	10.13	-0.60 ± 1.00	0.85 ± 1.00	-1.21 ± 1.00
7	TNGM	11.79	-0.09 ± 0.88	-1.09 ± 0.88	8.13 ± 0.88
8	15VL	12.08	-0.38 ± 1.03	-0.31 ± 1.03	-1.10 ± 1.03
9	TNGP	14.05	-0.17 ± 0.87	-0.07 ± 0.87	-1.62 ± 0.87

Обычно направление оси профиля выбирают в соответствии с направлением главных действующих горизонтальных тектонических сил в регионе. Таким образом, становится возможным визуально, количественно и качественно оценить взаимное смещение региональных тектонических структур относительно друг друга. Результаты построения профиля скоростей представлены на рис. 6 и в табл. 2.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценки скоростей смещений ГНСС станций в глобальной отсчетной основе ITRF2014 (табл. 1, рис. 4) показывают согласованное движение территории Владикавказа с общим движением всего Большого Кавказа в север-северо-восточном направлении со скоростью 27–30 мм/год, что подтверждает результаты ранее проведенных исследований [38, 40, 41, 43–45]. На основе этих оценок получены скорости смещений станций относитель-

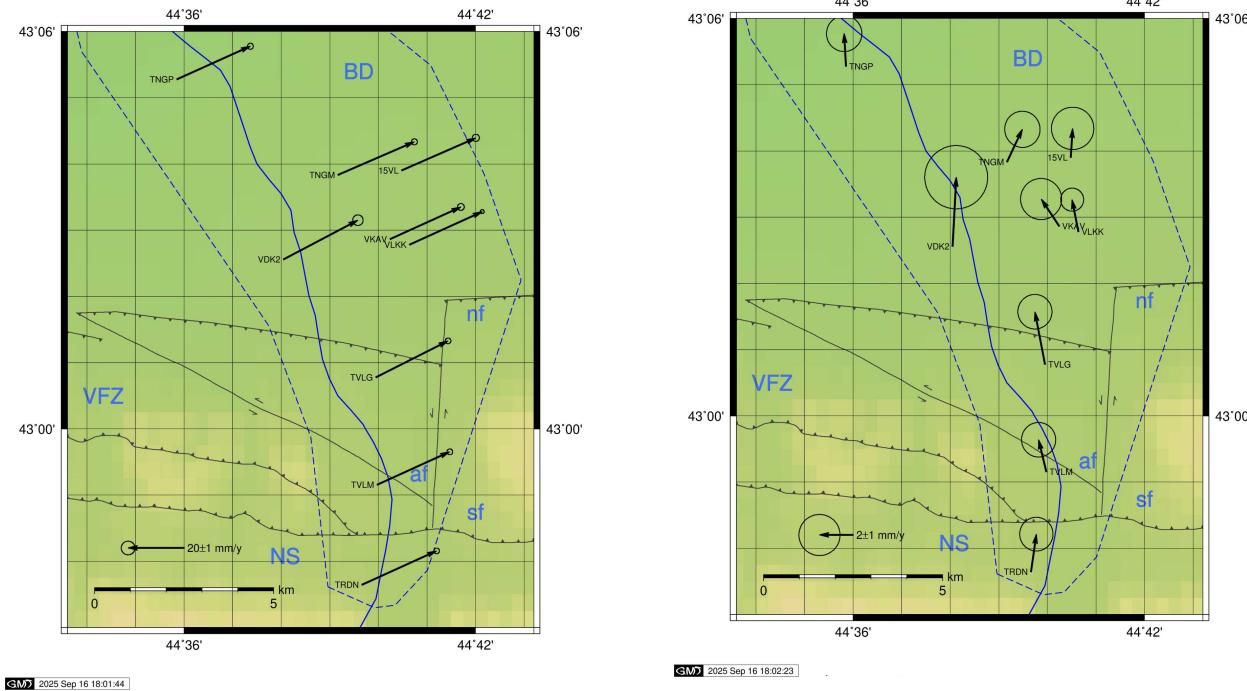


Рис. 4. Скорости смещений ГНСС-пунктов и станций, расположенных на территории Владикавказа (внутри пунктирной синей линии) в ITRF2014. Сплошная синяя линия на карте соответствует руслу реки Терек. Расшифровку буквенных обозначений на карте (NS, VFZ, BD, sf, nf, af) см. в подписи к рис. 1

Рис. 5. Скорости смещений ГНСС пунктов и станций, расположенных на территории Владикавказа (внутри пунктирной синей линии) в ITRF2014_EURA, относительно неподвижной Евразии. Сплошная синяя линия на карте соответствует руслу реки Терек. Расшифровку буквенных обозначений на карте (NS, VFZ, BD, sf, nf, af) см. в подписи к рис. 1

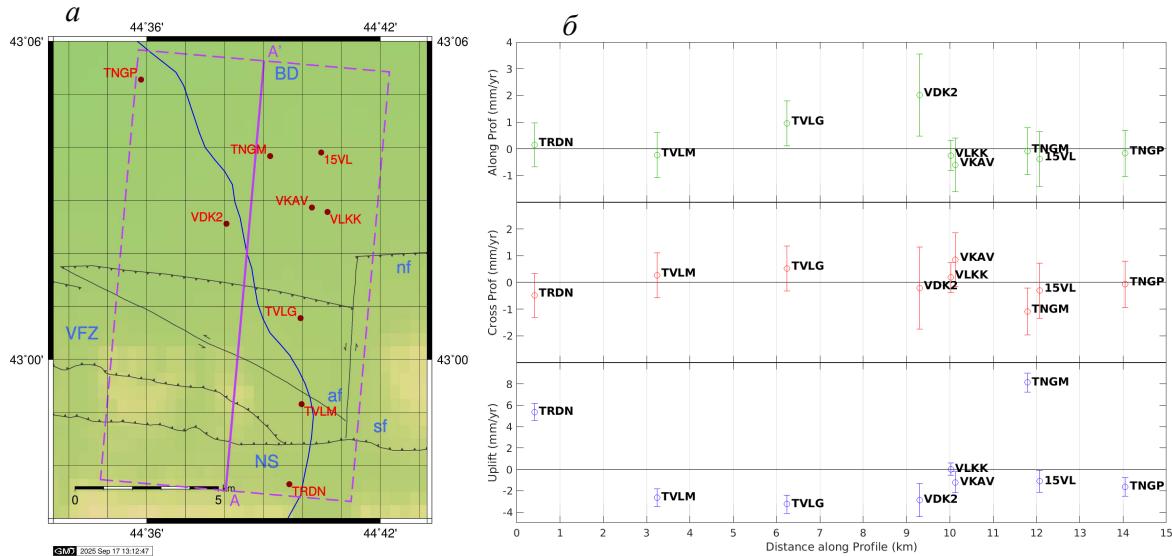


Рис. 6. а — Карта с расположением профиля скоро стей А—А' с азимутом 5.05° и б — графики скоростей смещений ГНСС пунктов и станций относительно неподвижной Евразии (ITRF2014_EURA), спроектированных на профиль А—А': верхнее панно — проекции скоростей смещения вдоль профиля, среднее панно — проекции скоростей поперек профиля, нижнее панно — вертикальные скорости. На графиках представлены остаточные скорости, полученные после вычитания линейной регрессии. Расшифровку буквенных обозначений на карте (NS, VFZ, BD, sf, nf, af) см. в подписи к рис. 1. Сплошная синяя линия на карте соответствует руслу реки Терек

но неподвижной Евразии (табл. 1, рис. 5). В системе ITRF2014_EURA преобладают северо-ориентированные горизонтальные вектора скорости 2–4 мм/год.

Результаты профилирования скоростей (табл. 2, рис. 6) показывают более детальную геодинамическую картину. Профиль А—А' имеет общую протяжённость 15 км с юга на север с азимутом 5.05° .

Профиль включает все изучаемые ГНСС-станции и полевые пункты, которые территориально охватывают: северный склон Большого Кавказа (пункт TRDN); Владикавказскую разломную зону (пункты TVLM, TVLG); Бесланскую депрессию (станции VDK2, VKAV, VLKK, 15VL; пункты TNGM, TNGP). Положительные скорости вдоль профиля имеют северную ориентацию, отрицательные — южную. Положительные скорости поперек профиля имеют восточную ориентацию, отрицательные — западную.

Таким образом, по скоростям вдоль профиля мы видим, что пункт TRDN и станции/пункты VKAV, VLKK, 15VL, TNGM, TNGP сближаются со скоростями в пределах 0.5 мм/год. В то же время пункты TVLM и TVLG имеют разнонаправленное движение: скорость TVLM юго-ориентирована, TVLG имеет северную ориентацию. При этом величина скорости TVLM составляет 0.24 мм/год, как и у большинства пунктов, а пункт TVLG смещается на север со скоростью 0.96 мм/год. Обособленно выделяется станция VDK2, расположенная в Бесланской депрессии на левом берегу реки Терек. Станция VDK2 смещается в северном направлении со скоростью, существенно превышающей скорости всех остальных станций и пунктов. Возможно, это связано с тектонической особенностью надпойменного участка левобережной части реки Терек. В любом случае для объяснения этого движения требуется более длительный и более детальный ГНСС мониторинг этой части региона.

Скорости поперек профиля показывают, что пункт TRDN на северном склоне и станции TNGM, 15VL, TNGP на юге Бесланской депрессии показывают восточную ориентацию в направлении движения. В то же время станции и пункты TVLM, TVLG, VDK2, VLKK, VKAV, расположенные внутри профиля, имеют западную ориентацию. Максимальный контраст скоростей проявляется между станцией VKAV (0.85 мм/год) и пунктом TNGM (-1.09 мм/год).

Вертикальные скорости показывают, что пункт TRDN на северном склоне испытывает относительное поднятие, в то время как зона Владикавказского разлома и Бесланская депрессия — относительное опускание. Причем опускание в разломной зоне происходит более интенсивно, чем в зоне депрессии, что особенно заметно у Северного крыла разлома, пункт TVLG показывает скорость -3.26 мм/год.

Таким образом, мы видим следующую кинематическую картину. В регионе исследования выделяют три крупных морфологических зоны: окраину северного склона Большого Кавказа, зону Владикавказского разлома и Бесланскую депрессию (материковую часть). Вдоль профиля северный склон и Бесланская депрессия показывают малоинтенсивное сближение, что должно приводить к сокращению земной коры; при этом зона Владикавказского разлома расширяется. В то же время движение левобережной части реки Терек в районе ГНСС станции VDK2 имеет повышенную скорость смеще-

ния вдоль профиля, что, вероятнее всего, связано с тектоническими особенностями и для объяснения требует более длительных наблюдений. Движение поперек профиля показывает, что северный склон и южная часть профиля в части Бесланской депрессии движутся сонаправлено на восток, а разломная зона и центральная часть профиля показывают обратное направление — западное, что должно приводить к растяжению коры в меридиональном направлении. Вертикальные скорости показывают относительный подъём северного склона над разломной зоной и следующей за ней депрессией. При этом разлом имеет более интенсивное опускание на северном крыле Владикавказской разломной зоны, чем Бесланская депрессия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование результатов спутниково-геодезических измерений на территории Владикавказа выявило ряд особенностей современного геодинамического режима. Изучаемая территория охватывает северный склон Большого Кавказа, восточный сегмент Владикавказской разломной зоны и материковую часть, расположенную на южной окраине Бесланской депрессии. В широтном направлении в целом происходит сокращение земной коры, в меридиональном направлении происходит ее растяжение. На фоне общей региональной геодинамической обстановки в зоне Владикавказского разлома наблюдается движение в широтном направлении, приводящее к растяжению. Северный склон и южная материковая часть движутся в восточном направлении, в то время как разломная зона и окраина материка движутся в западном направлении. В вертикальной плоскости северный склон испытывает значительное поднятие, относительно остальной части, изучаемой территории. При этом в осевой зоне и на северном крыле Владикавказского разлома отмечается значительное опускание относительно региона исследования. Таким образом, можно констатировать, что город Владикавказ находится в зоне относительно активных геодинамических процессов, что в целом согласуется с результатами раннее проведенных исследований о потенциальной сейсмической опасности и требует мониторинга на регулярной основе геодинамической обстановки данного региона.

Авторы выражают глубокую благодарность компаниям Геостройизыскания «ПРИН» и «ЮжгеоСеть» за предоставленный доступ к ГНСС-данным базовых станций, расположенных в городе Владикавказе.

Работа выполнена в рамках государственного задания Владикавказского научного центра РАН (измерения, анализ данных) и государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (обработка данных).

- [1] Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И. и др. Эндогенные опасности Большого Кавказа М.: ИФЗ РАН. 2014. 256 с.
- [2] Рогожин Е.А. Очерки региональной сейсмотектоники. М.: ИФЗ РАН. 2012. 340 с.
- [3] Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Новиков С.С., Рогожин Е.А. // Вестник Владикавказского НЦ РАН. **8**, № 3. 44 (2008).
- [4] Горбатиков А.В., Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Ларин Н.В. // Вопросы инженерной сейсмологии. **37**, № 3. 36 (2010).
- [5] Горбатиков А.В., Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А. и др. // Геофизические исследования. **12**, № 1. 47 (2011).
- [6] Шемелев А.Г. // Геол. журн. **42**, № 4. 97 (1982).
- [7] Письменный А.Н., Горбачев С.А., Вертий С.Н. и др. Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200 000. Изд. 2-е. Серия Кавказская. Листы К-38-IX, XV (Владикавказ). СПб: Изд-во картфабрики ВСЕГЕИ. 2006. 277 с.
- [8] Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: Академкнига. 2003. 375 с.
- [9] Богачкин Б.М., Борисов Б.А., Рогожин Е.А. // Физика Земли. № 8. 12 (1992).
- [10] Рогожин Е.А., Богачкин Б.М. // Физика Земли. № 3. 3 (1993).
- [11] Белоусов Т.П. Рачинское землетрясение 1991 года и его проявление в рельефе Большого Кавказа. М.: Светоч Плюс. 2009. 208 с.
- [12] Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С. // Геотектоника. № 6. 55 (2014).
- [13] Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Новиков С.С., Ларьков А.С. // Вестник Владикавказского НЦ РАН. **2**, № 4. 57 (2011).
- [14] Корженков А.М., Чиесев В.Т., Ларьков А.С., Овсяченко А.Н. / В сборнике: Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов. Материалы II Всероссийской научной конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук. Москва, 2024. С. 17–21.
- [15] Корженков А.М., Овсяченко А.Н., Едемский Д.Е. и др. // Геофизические процессы и биосфера. **24**. № 1. 74 (2025). (Korzenkov A.M., Ovsyuchenko A.N., Edemsky D.E. et al. // Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics. **61**(7). 834 (2025)).
- [16] Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000: Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН. 1999. 57 с.
- [17] Рогожин Е.А., Собисевич Л.Е., Нечаев Ю.В. и др. Геодинамика, сейсмотектоника и вулканизм Северного Кавказа. Под ред. акад. Н.П. Лаверова. М.: Изд-во ИФЗ РАН. 2001. 333 с.
- [18] Горбатиков А.В., Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А. и др. // Геофизические исследования. Т. 12, № 1. С. 47-59. (2011). (Gorbatikov A.V., Ovsyuchenko A.N., Rogozhin E.A. et al. // Seismic Instruments. **47**(4). 307 (2011)).
- [19] Милановский Е.Е., Хашн В.Е. Геологическое строение Кавказа. М.: Изд. МГУ. 1963. 357 с.
- [20] Краснопевцева Г.В. Глубинное строение Кавказского сейсмоактивного региона. М.: Наука. 1984. 108 с.
- [21] Шемелев 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. 457-463. (2008).
- [22] Милюков В.К., Дробышев В.Н., Миронов А.П. и др. // Вестник Владикавказского научного центра. **14**, № 4. 2 (2014).
- [23] Милюков В.К., Миронов А.П., Стеблов Г.М. и др. // Физика Земли. № 4. 68 (2015). (Milyukov V.K., Mironov A.P., Steblow G.M. et al. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. **51**(4). 522 (2015)).
- [24] Милюков В.К., Дробышев В.Н., Миронов А.П. и др. // Вестник Владикавказского научного центра. **14**, № 4. 25 (2014).
- [25] Милюков В.К., Дробышев В.Н., Миронов А.П. и др. // Вестник Владикавказского научного центра. **16**, № 4. 30 (2016).
- [26] Милюков В.К., Миронов А.П., Стеблов Г.М. и др. // Физика Земли. № 4. 110 (2017). (Milyukov V.K., Mironov A.P., Steblow G.M. et al. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. **53**(4). 598 (2017)).
- [27] Миронов А.П., Милюков В.К., Стеблов Г.М. и др. // Геофизические процессы и биосфера. **20**, № 4. 122 (2021). (Mironov A.P., Milyukov V.K., Drobyshev V.N. et al. // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. **57**(11). 1498 (2021)).
- [28] Altamimi Z., Metivier L., Collilieux X. // J. Geophys. Res. **117**. B07402. (2012).
- [29] Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2-х т. М.: Картгекоцентр. 1. 334 с. 2005; 2. 2006. 360 с.
- [30] Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK, Release 10.7. Cambridge: Mass. Inst. of Technol. 54. p. 2018.
- [31] Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS-analysis program, Release 10.4. Cambridge: Dept. of Earth Atmos. and Planet. Sci.; Mass. Inst. of Technol. 2010. 91 p.
- [32] Nikolaidis R. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System. University of California, San Diego. ProQuest Dissertations & Theses. 3148254. 2002.
- [33] Heflin M., Donnellan A., Parker J. et al. // Earth and Space Sci. **7**(7). e2019EA000644. (2020).
- [34] Bock Y., Melgar D. // Reports on Progress in Physics. **79**(10). 106801. (2016).
- [35] Dong D., Fang P., Bock Y., Cheng M.K., Miyazaki S.I. // J. Geophys. Res. Solid Earth. **107**(B4). P. ETG9-(1-16). (2002).
- [36] McClusky S., Balassanian S., Barka A., et al. // J. Geophys. Res. **105**. 5695 (2000).
- [37] Reilinger R., McClusky S., Vernant P., et al. // J. Geophys. Res. **111**. B05411. (2006).
- [38] Милюков В.К., Миронов А.П., Овсяченко А.Н. и др. // Доклады Академии наук. **481**, № 3. 291 (2018). (Milyukov V.K., Mironov A.P., Drobyshev V.N. et al. // Doklady Earth Sciences. **481**(1). 879 (2018)).
- [39] Sokhadze G., Floyd M., Godoladze T. et al. // Earth and Planetary Science Letters. **481**. 154 (2018).
- [40] Рогожин Е.А., Милюков В.К., Миронов А.П.

- и др. // Геофизические процессы и биосфера. **18**, № 1. 91 (2019). (Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Gorbatikov A.V. et al. // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. **55**(7). 759 (2019)).
- [41] Милюков В.К., Миронов А.П., Овсяченко А.Н. и др. // Геотектоника. № 1. 51 (2022). (Milyukov V.K., Mironov A.P., Ovsyuchenko A.N. et al. // Geotectonics. **56**(1). 41 (2022)).
- [42] Kadirov F., Yetirmishli G., Safarov R. et al. // ANAS Transactions, Earth Sciences. 1. 28 (2024).
- [43] Milyukov V., Koraev A., Zharov V. et al. // Journal of Geodynamics. **49**(3-4). 216 (2010).
- [44] Милюков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. // Геотектоника. № 3. 56 (2015). (Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblow G.M. Geotectonics. **49**(3). 210 (2015)).
- [45] Рогожин Е.А., Милюков В.К., Миронов А.П. и др. Геология и геофизика Юга России. № 4. 141 (2018).

Geodynamics of the Vladikavkaz Area Based on GNSS Observations at the Ossetian Geodynamic Polygon

A. P. Mironov^{1,2,a}, V. K. Milyukov^{1,2}, A. N. Ovsyuchenko³, Kh. M. Khubaev², S. O. Dzeboev²

¹Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University (SAI MSU)
Moscow 119234, Russia

²Vladikavkaz Scientific Center Russian Academy of Sciences

Vladikavkaz, 363110 Republic of North Ossetia-Alania, Russia

³Schmidt Institute of Physics of the Earth Russian Academy of Sciences

Moscow, 123995 Russia

E-mail: ^aalmir@physics.msu.ru

An analysis of the contemporary geodynamic situation in the Vladikavkaz area is presented, based on long-term GNSS (Global Navigation Satellite System) observations at continuous stations and field sites at the Ossetian geodynamic polygon. Velocity estimates were obtained in two reference frames: the global International Terrestrial Reference Frame (ITRF) and the regional Eurasia-fixed frame (ITRF2014_EURA). In the ITRF, the motion of the region is consistent with the overall motion of the Greater Caucasus in a northeasterly direction at a rate of 27–30 mm/year. The results of velocity profiling in the local reference frame showed a number of oppositely directed kinematic features that define the contemporary geodynamic regime of this area. These results, as well as those from seismological studies, indicate that the city of Vladikavkaz is located in a region with relatively active geodynamic processes.

PACS: 91.10.Kg; 91.30.Px

Keywords: geodynamics, modern movements of the Earth's crust, satellite geodesy, global navigation satellite systems, GNSS, Caucasus, Ossetia, Vladikavkaz.

Received 18 September 2025.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2026. **81**, No. 1. Pp. .

Сведения об авторах

1. Миронов Алексей Павлович — науч. сотрудник; e-mail: almir@physics.msu.ru.
2. Милюков Вадим Константинович — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: +7(495)939-16-34, e-mail: vmilyukov@yandex.ru.
3. Овсяченко Александр Николаевич — канд. геолого-минералогических наук, зав. лабораторией; e-mail: ovs@ifz.ru.
4. Хубаев Харитон Майорович — науч. сотрудник.
5. Дзебоев Станислав Олегович — канд. геолого-минералогических наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: stanislav.dzeboev@mail.ru.