

Геодинамика восточного сегмента Большого Кавказа по ГНСС наблюдениям

А.П. Миронов,^{1,*} В.К. Милуков,¹ А.Н. Овсяченко,² А.С. Ларьков,² Х.М. Хубаев³¹Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ)
Россия, 119234, Москва, Университетский проспект, д. 13²Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)
Россия, 123242, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1³Владикавказский научный центр Российской академии наук (ВНЦ РАН)
Россия, 363110, Республика Северная Осетия–Алания, Пригородный район, с. Михайловское, ул. Вильямса, 1
(Поступила в редакцию 08.04.2026; после доработки 30.04.2026; подписана в печать 04.05.2026)

В работе представлены результаты комплексного исследования геодинамических особенностей Восточного сегмента Большого Кавказа. Исследования геодинамики выполнены на основе оригинальных многолетних квазинепрерывных спутниково-геодезических наблюдений на 28 региональных станциях Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Обработка ГНСС измерений осуществлялась пакетом программ GAMIT/GLOBK, предназначенным для высокоточных геодезических определений по радионавигационным спутниковым сигналам. В результате обработки получены временные ряды приращения координат и скорости смещений ГНСС-станций в двух системах отсчета, глобальной ITRF2020 и региональной, относительно неподвижной Евразии. Для изучения относительных перемещений региональных тектонических структур применен метод скоростного профилирования. Был выбран профиль протяженностью 500 км с юга на север с азимутом 6.58° . Результаты профилирования выявили относительные движения основных региональных тектонических структур. Интерпретация полученных результатов в контексте региональной сейсмотектоники детализирует современную геодинамическую обстановку Восточного сегмента Большого Кавказа.

PACS: 91.10.Kg; 91.30.Px УДК: 551.24

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

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.81.2630804

ВВЕДЕНИЕ

Восточный сегмент Большого Кавказа — это обширная горная территория, включающая (с севера на юг): платформенное крыло Терско-Каспийской впадины (окраина Скифской плиты); Терско-Каспийский предгорный прогиб; Северный склон Большого Кавказа, включающий Дагестанский клин; Осевую зону Большого Кавказа; Южный склон; Куринскую межгорную впадину; Апперонскую складчатую зону. Регион характеризуется интенсивной геодинамической активностью и сейсмичностью. На Большом Кавказе этот регион отличается самым высоким уровнем сейсмической активности за инструментальный период наблюдений. Здесь неоднократно происходили разрушительные землетрясения. Самые сильные произошли в 1970 г. (Дагестанское, $M_s = 6.6$, $I_0 = 9$ баллов), в 1992 г. (Барисахское, $M_s = 6.3$, $I_0 = 7 - 8$ баллов), что сопоставимо с разрушительным Рачинским землетрясением 1991 г. ($M_w = 7.0$, $I_0 = 8 - 9$ баллов), произошедшим в центральном секторе Большого Кавказа.

На сегодняшний день, учитывая сложность региона с тектонической точки зрения, в северной

части Восточного сегмента Большого Кавказа пока отсутствует полноценный геодинамический мониторинг средствами ГНСС (Глобальных навигационных спутниковых систем). Речь идет о мониторинге, который включает как спутниково-геодезические наблюдения, так и своевременную высокоточную обработку данных и интерпретацию полученных результатов. Геодинамика южной части изучается средствами ГНСС уже более 25 лет [54] и достаточно плодотворно [8, 10, 13, 52, 53]

Для северной части впервые аналогичные работы были представлены в публикациях [2, 5, 22, 25]. В частности, для Восточного сегмента Большого Кавказа в публикации [5] по наблюдениям ГНСС-станций представлены количественные оценки средних и аномальных скоростей горизонтальных движений, площадных и сдвиговых деформаций в сопоставлении с величиной выделившейся за десятилетие сейсмической энергией.

Данная работа ставит своей целью комплексное исследование геодинамических особенностей Восточного сегмента Большого Кавказа на основе многолетних квазинепрерывных спутниково-геодезических наблюдений 28 региональных ГНСС-станций и интерпретацию результатов в контексте региональной сейсмотектоники.

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

1. АКТИВНАЯ ТЕКТОНИКА ВОСТОЧНОГО КАВКАЗА

По данным ЕГС РАН, СКЗ ОСР-2012 и [7, 9] выполнено обобщение имеющихся данных по сейсмичности Восточного сегмента Большого Кавказа, в результате чего составлена уточненная эпицентрально-карта исторических и инструментально зарегистрированных землетрясений Восточного сегмента Большого Кавказа. Результаты представлены на рис. 1.

Для геодинамического анализа рассмотрены тектоническое строение и сейсмотектоническая обстановка Восточного сегмента Большого Кавказа. Основные структуры, определяющие тектоническое устройство региона, — горное сооружение Большого Кавказа; Терско-Каспийский предгорный прогиб и эпигерцинская Скифская плита. Скифская плита отличается пологим залеганием новейших отложений, а палеозойский складчатый фундамент здесь испытывает постепенное понижение к югу от 3 до 5–6 км. Южная зона Терско-Каспийского предгорного прогиба, примыкающая к структурам Большого Кавказа, представляет собой глубокую предгорную депрессию, разделенную диагональными антиклинальными перемычками на замкнутые впадины: Осетинскую на западе и Чеченскую на востоке, в пределах которых поверхность фундамента погружается до 9 км. Главными элементами структуры предгорного прогиба являются две линейные антиклинальные зоны: северная — Терская и южная — Сунженская, выраженные в рельефе одноименными низкогорными передовыми хребтами. Интенсивный рост антиклинальных складок вплоть до современности отражен в деформациях плейстоцен-голоценовых речных террас.

Максимальная напряженность новейших деформаций как в фундаменте, так и в осадочном чехле наблюдается в прикавказской зоне Терско-Каспийского прогиба, вошедшей на неотектоническом этапе с состав орогена. Наиболее приподнята эта зона в пределах Дагестана — так называемый «Дагестанский клин». Южная граница Терско-Каспийского прогиба морфологически выражена довольно резким переходом от низко- и среднегорного рельефа северного крыла Дагестанского клина к Прикаспийской низменной равнине. Наличие подобного контраста обусловлено наличием здесь Сулакской флексурно-разрывной зоны, затрагивающей весь разрез отложений, начиная с меловых. В её пределах выделяются Гилянский и Наратюбинский взбросо-надвиги, смещающие миоценовые отложения на 1 км и более, и затухающие книзу в породах майкопской серии. Разломы имеют падение в сторону Терско-Каспийского прогиба и служат поверхностями относительного надвигания осадочных толщ прогиба на горное сооружение.

По характеру складчатости вкрест простирания горного сооружения Большого Кавказа выделяются следующие структуры: узкая (около 10 км) чешуйчатая моноклинал Северного крыла; коробча-

тые и открытые дугообразные складки Дагестанского клина; килевидные и изоклинальные складки Осевой зоны. Северное крыло Большого Кавказа — широкое, относительно пологое, а Южное — крутое и сильно сжатое. В Осевой зоне выделяются новейшие поднятия Главного и Бокового хребтов, разделенные зоной Тляратинского взброса и Бежтинской депрессией. Крупнейшей структурой поперечного (северо-восточного) простирания является Андийская система разрывов, отделяющая с запада Дагестанский клин. При детальном картировании речных террас и геоморфологическом анализе в предгорьях Дагестана (долина р. Акташ), был выявлен крупный левосторонний сбросо-сдвиг, смещающий плейстоценовые осадки.

В современной геодинамике Большого Кавказа главную роль играют взбросо-надвиги, вытянутые вдоль простирания основных хребтов, и диагональные или поперечные по отношению к ним сдвиги и взбросы [35, 46]. Максимальной активностью отличаются взбросо-надвиги Южного склона Большого Кавказа. Очаги сильных землетрясений 1991 (Рачинское, $M_w = 7.0$) и 1992 (Барисахское, $M_s = 6.3$) гг. отразили основную тенденцию геологического развития Южного склона — наряду с относительным воздыманием складчатой системы, взаимное сближение горного сооружения и Закавказской системы срединных массивов и межгорных впадин, поддвижение пород фундамента последнего под Большой Кавказ и в связи с этим отрыв от основания и надвигание в южном направлении пород альпийского чехла. В Осевой зоне и на Северном склоне Большого Кавказа тектонические деформации по геологическим данным имеют более сложный характер и меньшую интенсивность.

Для анализа геодинамической обстановки Восточного сегмента Большого Кавказа и получения количественных кинематических оценок взаимных движений тектонических блоков в работе используются многолетние, квазинепрерывные измерения 28 региональных ГНСС-станций (табл. 1, рис. 1).

На Северном склоне Восточного Кавказа наиболее контрастная тектоническая граница расположена между Терско-Каспийским прогибом и Дагестанским клином. Здесь происходит резкий переход от низко- и среднегорного рельефа Восточного Кавказа к Прикаспийской низменной равнине. Эта граница контролируется Махачкалинской (Сулакской) флексурно-разрывной зоной, в пределах которой происходит резкое погружение всего комплекса кайнозойских отложений, вплоть до голоценового аллювия и соответствующих речных террас [21, 27]. Эти деформации фиксируют опускание Терско-Сулакского сегмента предгорного прогиба. Здесь расположены ГНСС-станции KIZL, BBYR, HASV, KZIL.

Западнее в пределах прогиба выделяется Терско-Сунженская складчатая зона, которая представляет собой глубокую предгорную депрессию, разделенную диагональными антиклинальными пере-

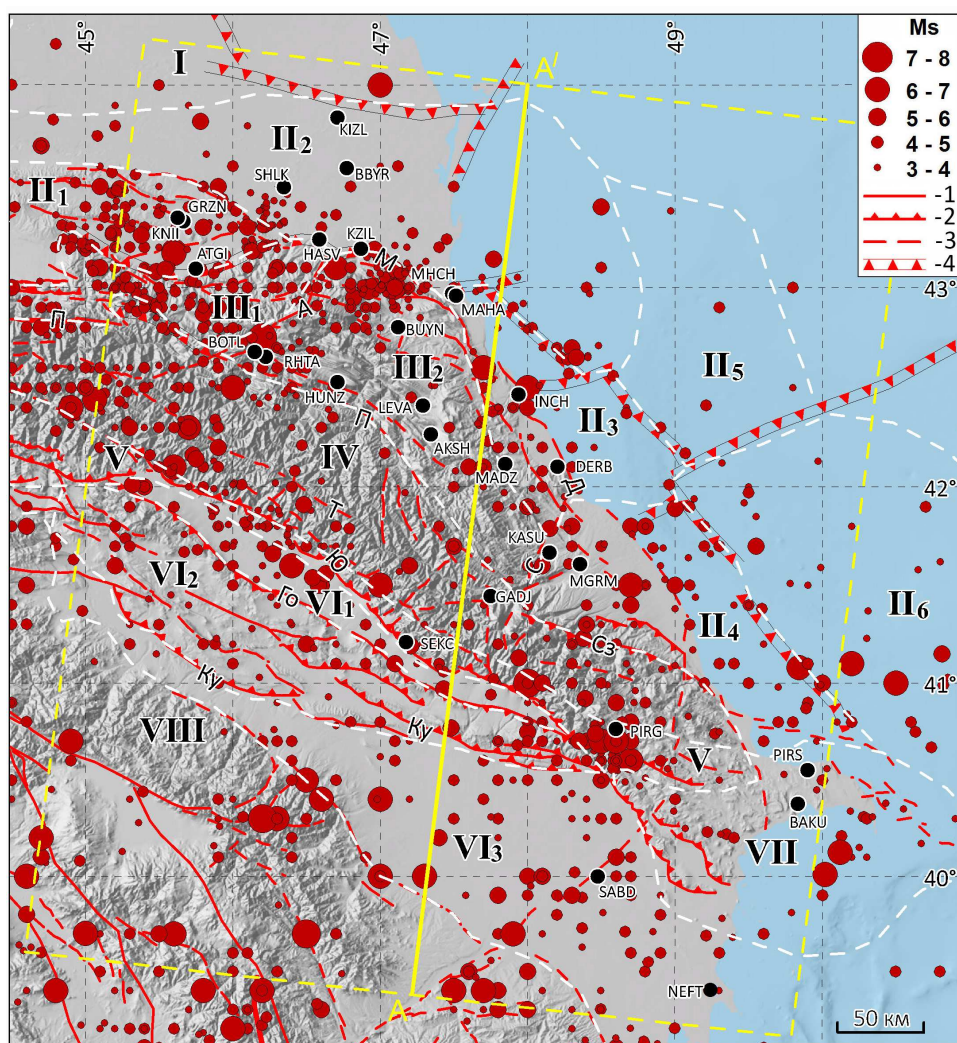


Рис. 1. Активные разломы, сейсмичность и крупнейшие морфоструктуры Восточного Кавказа. Эпицентры исторических и инструментально зарегистрированных землетрясений представлены по данным ЕГС РАН, СКЗ ОСР-2012 и [7, 9]. Желтой линией показан профиль скоростей смещений А-А'. **Легенда:** 1-4 — активные тектонические нарушения (с использованием данных [21, 27, 30, 31, 35, 65]): 1 — преимущественно сдвиги; 2 — взбросы и надвиги (штрихи направлены в сторону поднятого крыла); 3 — разломы по косвенным данным; 4 — флексурно-разрывные зоны. **Крупнейшие системы активных разломов**, обсуждаемые в тексте: М — Махачкалинская (Сулакская); А — Андийская; П — Пуйская; Д — Дербентская; С — Самурская; Сз — Сиазанская; Т — Тляратинская (Тибская); Ю — система взбросо-надвигов Южного склона; Го — Гомборская; Ку — Куринская. **Крупнейшие морфоструктуры** (границы показаны белыми штриховыми линиями, с использованием данных [17, 21, 27, 39]): I — Скифская плита (платформенное крыло Терско-Каспийской впадины); II — Терско-Каспийский предгорный прогиб (II₁ — Терско-Сунженская складчатая зона; II₂ — Терско-Сулакская впадина; II₃ — Избербаш-Дербентская складчатая зона; II₄ — Кусаро-Дивичинская впадина; II₅ — Самуро-Песчаномысская седловина; II₆ — Северо-Апшеронская впадина); III — Северный склон Большого Кавказа (III₁ — моноклиальная зона; III₂ — Дагестанский клин); IV — Осевая шовно-блоковая зона; V — складчато-надвиговая зона Южного склона; VI — Куринская межгорная впадина (VI₁ — Алазанская впадина; VI₂ — Куринско-Аджиноурская складчатая зона; VI₃ — Кура-Араксинская впадина); VII — Апшеронская складчатая зона; VIII — горное сооружение Малого Кавказа

мычками на замкнутые впадины: Осетинскую на западе и Чеченскую на востоке. Интенсивный рост Терской и Сунженской антиклинальных складок вплоть до современности отражен в деформациях плейстоцен-голоценовых речных террас [21, 27] и результатах повторных геодезических наблюдений [42]. Здесь расположены ГНСС-станции GRZN, KNII, ATGI.

Махачкалинская зона, помимо флексурно-раз-

рывных деформаций, объединяет Гилянский и Нараттюбинский взбросо-надвиги, смещающие миоценовые отложения на 1 км и более, и затухающие книзу в породах майкопской серии. С Нараттюбинским разломом связана тектоническая деформация позднехазарской морской террасы (возраст около 100 тыс. лет), которая была поднята на высоту около 100 м [11]. Следы палеоземлетрясений по Нараттюбинскому разлому (сейсмогенная трещина

Таблица 1. Стационарные ГНСС-станции Восточного сегмента Большого Кавказа

п/п	Организация	Код	Местоположение
	Азербайджанская Республика		
1	IGS	BAKU	Баку
2		NEFT	Нефтечала́
3		PIRG	Шемахинская астрофизич. обс. НАН Азербайджана
4		PIRS	Пиршаги
5		SABD	Сабирабад
6		SEKC	Шеки́
	Россия		
7	ВНЦ РАН	KNII	Грозный
8	ГАУ РД ЦИТ ^а	AKSH	Акуша́
9		ATGI	Старые Атаги́
10		BBYR	Бабаю́рт
11		BOTL	Бо́тлих
12		BUYN	Буйна́кск
13		GADJ	Ахты́
14		HUNZ	Хунза́х
15		KASU	Касумке́нт
16		KZIL	Кизилю́рт
17		MADZ	Маджа́лис
18	НАВГЕОКОМ	DERB	Дагестанские Огни
19		HASV	Хасави́урт
20		LEVA	Левашы́
21		MAHA	Махачкала
22	ПРИН	GRZN	Грозный
23		INCH	Инчхе
24		KZLR	Кизля́р
25		MGRM	Магарамкент
26		MHCH	Махачкала
27		RHTA	Раха́та
28		SHLK	Шелковская́

^а — данные измерений ГНСС-станций ГАУ РД «Центр Информационных Технологий» доступны авторам через интернет-ресурс <https://hive.geosystems.aero/>.

СЗ простирания длиной более 120 м) обнаружены в верховьях «ущелья Маркова» в осевой зоне хребта Нарат-Тюбе [18]. При землетрясении произошел вертикальный взброс южного блока на несколько десятков сантиметров.

Гилянский и Нараттюбинский разломы имеют падение в сторону Терско-Каспийского прогиба и в приповерхностном разрезе служат поверхностями относительного надвигания осадочных толщ прогиба на горное сооружение [6, 38]. В глубоких горизонтах чехла по геофизическим данным Махачкалинская зона соответствует пологой поверхности Северного фронтального надвига Дагестанского клина на Терско-Каспийский прогиб. Надвигание реконструируется таким образом: мезозойские породы Дагестанского клина вклиниваются в разрез кайнозойских осадков прогиба, перекрывая их нижнюю часть и соскабливая верхнюю, которая оказалась сорванной и надвинутой в обратном, южном

направлении [38]. Именно такая модель наиболее непротиворечиво объясняет подвижку в очаге сильнейшего на инструментальном этапе Дагестанского землетрясения 1970 г. с $M_s = 6.6$, $I_0 = 9$ баллов [35]. В пределах Дагестанского клина расположены станции BUYN, BOTL, RHTA, HUNZ, LEVA, AKSH.

Вдоль побережья Каспийского моря Дагестанский клин обрамляется Избербаш-Дербентской складчатой зоной, которая выделяется в Терско-Каспийском предгорном прогибе в качестве промежуточной ступени к горному сооружению Большого Кавказа [17]. В этой полосе протягивается несколько антиклинальных и разломных зон [39]. Вдоль побережья Каспийского моря они объединяются в Дербентскую систему активных разломов ССЗ простирания с преимущественно правостдвиговой кинематикой смещений. Главным сейсмотектоническим отличием зоны являются относительно

глубокие очаги землетрясений ($h = 40 - 80$ км и более) [4]. На южном отрезке зоны была выявлена очаговая зона землетрясения, которое привело к одноактному праводвиговому смещению раннесредневековой городской стены Дербента на $0.9 - 1.4$ м [30]. Магнитуда этого события составила $M \approx 7$; возраст, вероятнее всего, — X в. В Изербаш-Дербентском сегменте прогиба расположены ГНСС-станции МНСН, МАНА, ИНСН, MADZ, DERB.

Строение Терско-Каспийского прогиба осложняется Самурской разломной зоной поперечного простирания, по которой происходит резкое погружение мезозойского складчатого основания Восточного Кавказа под кайнозойские осадки Кусаро-Дивичинской впадины [21]. По данным высокоточного повторного нивелирования 1914–1970 гг. вдоль профиля Грозный — Баку к югу от зоны Самурского разлома было выявлено резкое опускание со скоростью более 3 мм/год, что указывает на его современную активность [42]. В зоне Самурского разлома и на его пересечении с разломами продольной ориентировки известны умеренные по силе землетрясения: 1878 г. ($M_s = 5.7$, $h = 20$ км), 1966 г. ($M_s = 5.4$, $h = 16$ км) [15]. На основе структурно-геоморфологических данных для Самурского разлома предполагается взбросовая и праводвиговая кинематика молодых смещений [64]. В Кусаро-Дивичинском сегменте прогиба расположены ГНСС-станции KASU, MGRM.

На кайнозойские осадки Кусаро-Дивичинского сегмента Терско-Каспийского прогиба мезозойское складчатое основание Восточного Кавказа взброшено или надвинуто по Сиазанскому разлому [21]. Разлом демонстрирует очень высокую молодую тектоническую активность. Величины вертикальных смещений по нему за постсарматское время составляют от 840–1200 м. Скорость поднятия данного отрезка Юго-Восточного Кавказа, реализуемого в основном по зоне Сиазанского разлома, в среднем плейстоцене–голоцене, оценена в 2.5 мм/год, что больше скорости поднятия Армянского нагорья на 0.4 мм/год [64]. При этом, на инструментальном этапе наблюдений зона разлома демонстрирует низкую активность — здесь известны умеренные по силе землетрясения 1971 г. ($M_s = 5.5$, $h = 5$ км и $M_s = 5.3$, $h = 12$ км) [15].

С запада Дагестанский клин ограничен Андийской системой разрывов поперечного простирания. При детальном картировании речных террас в долине р. Акташ, был выявлен крупный левосторонний сбросо-сдвиг смещающий плейстоценовые осадки [27]. Масштабные сейсмотектонические и сейсмогравитационные палеосейсмодислокации выявлены в районе сел Анди и Гагатли [29]. Минимальная магнитуда события составила $M_w = 6.2 - 6.7$. В 2018–2019 гг. в этом районе зарегистрирован рой из более сотни слабых землетрясений, самые сильные из которых имели $M = 3.1 - 3.5$. По результатам исследования механизмов очагов пяти наиболее сильных землетрясений установлен тип смещений — левосторонний сдвиг со сбросовой компонен-

той, что позволило отнести сейсмическую активизацию к разрядке накопившихся напряжений в восточном крыле Андийского разлома [3].

В Осевой зоне Большого Кавказа залегание раннеюрских толщ имеет ярко выраженную антиклинорную структуру, распадаясь на две основные продольные зоны — антиклинории Главного и Бокового хребтов, прямо выраженные в рельефе одноименными морфоструктурами и разделенные Бежитинской синклинойной внутригорной впадиной. Поднятие Бокового хребта существенно моложе Главного хребта, опережает в росте, а Бежитинская впадина испытывает относительное опускание, что находит отражение в распределении деформаций речных террас в долинах Андийского, Аварского, Кара-и Казикумухского Койсу и разновозрастных вершинных поверхностей [27]. В Осевой зоне расположена ГНСС-станция GADJ.

Граница между Дагестанским клином и поднятием Бокового хребта представлена Пуйской системой взбросов ЗСЗ простирания с северным падением сместителей, смещающих верхнеюрские и нижнемеловые отложения [41]. В Северной Осетии по результатам палеосейсмологических исследований были получены сведения по крайней мере о восьми сейсмических событиях за последние 9 тыс. лет с $M = 6.5 - 7.2$ [16, 31, 34]. В морфоструктурном отношении очаги этих землетрясений привязываются к зоне Владикавказского разлома, обрамляющего Большой Кавказ с севера, и южному подножию Скалистого хребта (Пуйская система разломов), продолжающегося в пределы Чечни в виде менее приподнятой Черногорской моноклинали. На территории Чечни в четвертичных отложениях и формах рельефа была изучена Ботлихская флексура [27]. Система палеосейсмодислокаций по дистанционным продолжается вдоль южного склона поднятия Скалистого хребта из Северной Осетии в пределы Ингушетии и Чечни. В Дагестане подобных исследований в этой зоне не проводилось.

С юга поднятие Бокового хребта ограничивается Тляртинским (Тибским) взбросом, круто падающим в северном направлении [41]. В Горном Дагестане, в зоне этого разлома отмечены многочисленные современные сейсмотектонические разрывы, сейсмогенные оползни-срывы, ступенчатость русел речных долин и их подпруженность на отдельных участках [27]. Все это указывает на сейсмотектоническую активность разлома.

Эти три субширотные зоны, контролируемые крупнейшими разломными структурами общекавказского простирания — Махачкалинской, Пуйской и Тляртинской, и узлы их сочленения с разломами поперечной ориентировки характеризуются максимальной активностью в пределах Дагестана по геологическим и сейсмологическим данным [19].

В восточном направлении горное сооружение Большого Кавказа погружается в пределах Апшеронской складчатой зоны. Если в пределах собственно Большого Кавказа новейшие складки сохраняют «общекавказское» простирание, то на Ап-

шеронском п-ове они становятся брахиформными и удлинёнными в разных направлениях [21]. Это может быть связано с выжиманием материала в горизонтальном направлении от зоны максимального сжатия и сокращения в пределах Южного склона и Осеовой зоны. В Апшеронской складчатой зоне расположены ГНСС-станции PIRS, BAKU.

Очень узкий (около 15–20 км) и крутой южный склон обусловил асимметрию Большого Кавказа, выраженную как в структурно-вещественных комплексах, так и в современной морфоструктуре. Вдоль пояса надвигов Южного склона Большой Кавказ надвинут или взброшен на Закавказскую систему межгорных прогибов и срединный (Дзиркульский) массив. На Восточном Кавказе Южное крыло почти полностью погружено под молодые отложения Алазанской впадины Куринского межгорного прогиба. Модельным для всего южного склона Большого Кавказа стало Рачинское землетрясение 1991 г. с $M_w = 7.0$. Оно продемонстрировало современную активность надвигов, по которым зоны Южного склона надвинуты на Дзиркульский массив Закавказья. Эта тенденция прослеживается для всего орогенного этапа [33]. На Южном склоне расположены ГНСС-станции SEKC, PIRG.

В структуры Южного склона Восточного Кавказа А.А. Никоновым [28] по историко-археологическим данным помещён очаг катастрофического ($I_0 = 9.5 \pm 0.5$ баллов) землетрясения 1668 г. с $M = 8.0 \pm 0.5$. В пределах этих же структур произошло Шемахинское землетрясение 1902 г. с $M = 6.9$, которое отличалось неглубоким положением очага ($h = 15$ км) и разрушительным эффектом на поверхности ($I_0 = 8 - 9$ баллов) [15]. По данным палеосейсмологических исследований магнитуда события 1902 г. могла быть больше — $M_w = 7.4$ [58].

В целом Южный склон Восточного Кавказа, в отличие от Куринско-Аджиноурской складчатой зоны, характеризуется очень высокой сейсмической активностью на инструментальном этапе сейсмологических наблюдений [20]. Большинство активных разломов Южного склона и Куринско-Аджиноурской складчатой зоны, простирающихся на ЗСЗ параллельно оси горного сооружения, характеризуются взбросо-надвиговыми смещениями в позднем плейстоцене – голоцене [14, 40, 61]. Направления молодых смещений по разломам здесь отражают условия субмеридионального или северо-восточного горизонтального сжатия и укорочения. С взбросо-надвиговыми сопряжены и растущие антиклиналы Куринско-Аджиноурской складчатой зоны. Основные деформации изучены на южном ограничении складчатой зоны, где трассируется Куринский активный надвиг. По данным палеосейсмологических исследований на восточном фланге надвига магнитуда событий 1668 г. и 334–118 гг. до н.э. оценивается в $M > 7.7$ [58]. Скорость голоценового сокращения по надвигу определена в пределах 8 – 8.5 мм/год. Скорость голоценового вертикального поднятия северного крыла на западном фланге Куринского разлома оценена в пре-

делах 1.6 – 3.75 мм/год [63]. Сейсмический потенциал, рассчитанный по общей длине разлома с такими высокими скоростями смещений, составляет $M_w = 7.5 - 7.9$, с учетом возможной сегментации разлома $M_w = 6.1 - 7.2$. Для восточного фланга по палеосейсмологическим данным получены близкие оценки $M_w = 7.7 - 8$ [58]. В Куринском прогибе расположены ГНСС-станции SABD, NEFT.

2. ГНСС-ДАННЫЕ, ОБРАБОТКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование геодинамического режима Восточного сегмента Большого Кавказа основывается на анализе временных рядов положений 28 региональных (определяемых) ГНСС-станций (табл. 1, рис. 1). Координаты региональных ГНСС-станций вычисляются при постобработке измерений в дифференциальном режиме. Положение определяемых станция вычисляется относительно 60 базовых станций IGS (Международная ГНСС-служба), включенных в Международную опорную земную систему отсчета (ITRF) [43]. Так же в постобработке используются измерения базовых ГНСС-станций ГАИШ МГУ, расположенных на Северном Кавказе и Крыму [22]. Выбранные базовые станции расположены так, что покрывают полусферу земной поверхности, в центре которой расположен Восточный сегмент Большого Кавказа.

Исходные ГНСС данные представляют собой наборы фазовых и кодовых измерений на двух частотах (GPS L1, L2) с интервалом регистрации 30 с. Обработка измерений включает следующие этапы. На первом этапе осуществляется совместное уравнивание в дифференциальном режиме фазовых измерений, полученных на опорных и определяемых станциях, 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 совмест-

ное взвешенное уравнивание полученных первичных оценок с аналогичными результатами уравнивания тех же опорных станций в составе всей мировой сети IGS [1, 50, 51].

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

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

в которой учитывается линейная зависимость (a, b); сезонные составляющие: годовые — (c, d), полугодовые — (e, f) и скачкообразные изменения местоположения станции (H — ступенчатая функция Хевисайда) [44, 45, 48, 57]. На рис. 2 представлен фрагмент ряда суточных оценок топоцентрических координат ГНСС-станции в Кизилёрте (KZIL) в ITRF2020 за период с 2021 г. по конец 2025 г. Данный временной ряд обработан фильтром Калмана с регрессионной моделью вида (1), в результате чего получены оценки компонент скорости смещения станции.

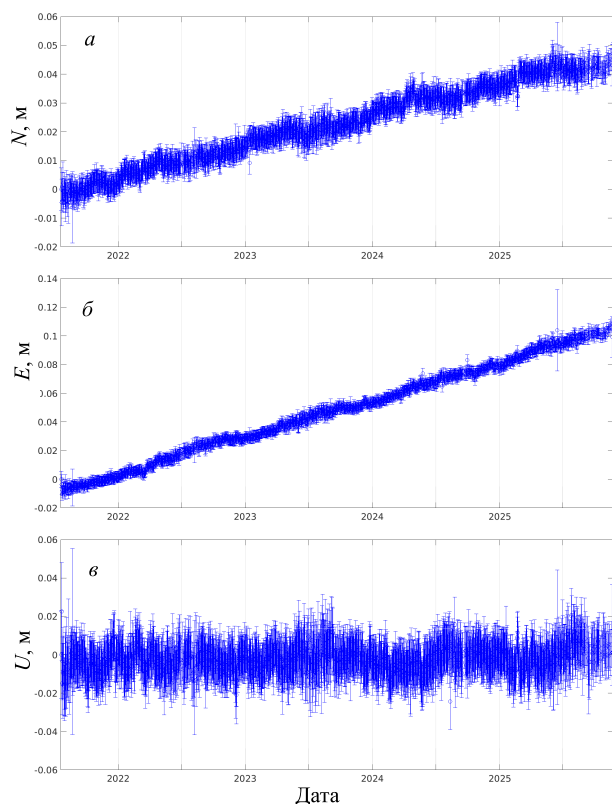


Рис. 2. Вычисленные временные ряды приращений топоцентрических координат ГНСС-станции KZIL в ITRF2020 за период 2021–2025 гг. На верхней панели (а) представлена северная компонента — N, на средней панели (б) восточная — E, на нижней панели (в) вертикальная — U. На графиках ряды координат приведены к нулю путём вычитания значений первых точек

В результате обработки получены временные

ряды приращения координат и скорости смещений ГНСС-станций в глобальной системе отсчета ITRF2020 (табл. 2, рис. 3) и в региональной системе отсчета, связанной с неподвижной Евразией ITRF2020_EURA (табл. 2, рис. 4). Обработка ГНСС измерений осуществлялась пакетом программ GAMIT/GLOBK, предназначенным для высокоточных геодезических определений по радионавигационным спутниковым измерениям [50, 51] на комплексе хранения и обработки астрономических данных ГАИШ МГУ (<https://istina.msu.ru/equipment/card/9351754/>).

Для изучения относительных перемещений региональных тектонических структур используется общепринятый метод скоростного профилирования [23, 24, 26, 37, 49, 54, 55, 59, 60]. Метод состоит в следующем. Положение спутниково-геодезических станций описывают в соответствии с региональными тектоническими структурами. На тектоническую карту накладывают профиль. Направление главной оси профиля выбирают в соответствии с направлением главных действующих горизонтальных тектонических сил в регионе. Исходные векторы скоростей смещений ГНСС-станций в локальной системе отсчета (ITRF2020_EURA) проецируются в направлении вдоль профиля и под углом 90° (против часовой стрелки) к профилю [49].

В результате скоростного профилирования получается кинематическая карта с сонаправленными и перпендикулярными компонентами скоростей на заданное направление. Таким образом, становится возможным визуально, качественно и количественно оценить взаимное перемещение региональных тектонических структур относительно друг друга. Результаты построения профиля скоростей представлены в табл. 3 и на рис. 5.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Особенности глобальных и региональных скоростей

Оценки горизонтальных скоростей смещений ГНСС-станций в глобальной системе отсчета ITRF2020 (табл. 2, рис. 3) показывают согласованное движение Восточного сегмента Большого Кавказа с общим движением всего Большого Кавказа в север-северо-восточном направлении. Это подтверждает результаты ранее проведенных исследований [22–25, 36, 37, 56].

При этом уже в масштабе глобальной системы отсчета видно отличие скоростей движения для северной и южной частей Восточного сегмента Большого Кавказа. ГНСС-станции, расположенные в северной части Восточного сегмента (табл. 2, п. 1–22), показывают среднестатистическую скорость горизонтальных смещений 28.22 ± 1.06 мм/год с азимутом 67.72° . Станции SEKC, PIRG, SABD, NEFT (табл. 2, п. 23, 24, 27, 28), расположенные в южной части, показывают среднестатистическую горизон-

Таблица 2. Горизонтальные скорости смещений и азимуты ГНСС-станций в ITRF2020 и ITRF2020_EURA. Азимут отсчитывается от направления на Север, положительный — по часовой стрелке, отрицательный — против часовой стрелки. Графически вектора представлены на рис. 3, 4

п/п	Код	ITRF2020		ITRF2020_EURA	
		V, mm/yr	Azimuth, °	V, mm/yr	Azimuth, °
1	KZLR	26.97±0.96	70.60	1.24±0.96	−96.95
2	BBYR	26.98±0.92	71.41	1.27±0.92	−114.74
3	SHLK	26.26±1.71	75.69	3.08±1.71	−159.44
4	GRZN	27.36±1.25	67.91	1.58±1.25	−54.00
5	KNII	27.72±0.93	67.50	1.62±0.94	−40.26
6	ATGI	28.74±0.76	66.46	2.11±0.76	−5.98
7	HASV	27.53±0.90	67.26	1.89±0.90	−40.93
8	KZIL	27.51±1.01	67.41	1.99±1.01	−43.78
9	МАНА	29.55±0.95	67.45	2.45±0.96	12.27
10	MHCH	28.59±1.17	65.29	3.01±1.17	−16.21
11	BUYN	28.57±0.91	66.31	2.51±0.91	−15.26
12	RHTA	29.26±1.15	66.24	2.50±1.15	1.60
13	BOTL	29.08±0.92	66.66	2.25±0.92	−0.76
14	HUNZ	28.81±0.91	67.08	2.07±0.91	−7.78
15	LEVA	28.85±0.86	68.12	1.76±0.86	−1.95
16	AKSH	28.89±0.84	64.76	3.40±0.84	−12.04
17	INCH	29.07±1.41	64.97	3.48±1.41	−9.76
18	MADZ	27.00±0.91	69.01	1.91±0.91	−65.85
19	DERB	27.65±0.86	69.13	1.53±0.86	−46.06
20	KASU	29.33±0.91	67.61	2.35±0.91	2.19
21	MGRM	28.40±1.15	65.76	3.11±1.15	−21.29
22	GADJ	28.82±0.91	67.15	2.31±0.91	−11.21
23	SEKC	30.76±0.49	60.79	5.87±0.49	−0.20
24	PIRG	32.62±0.74	66.29	5.11±0.75	33.19
25	PIRS	30.24±0.83	73.34	1.79±0.83	81.96
26	BAKU	32.38±0.47	73.05	3.90±0.48	76.21
27	SABD	38.10±0.93	58.88	12.25±0.93	26.57
28	NEFT	35.99±0.59	59.49	10.40±0.60	21.36

тальную скорость 34.37 ± 0.71 мм/год с азимутом 61.36° . Таким образом, южная часть опережает северную на 18%, имея на 10% более северную ориентацию. Станции PIRS и BAKU (табл. 2, п. 25, 26), расположенные на Апшеронском полуострове, смещаются со скоростью 31.31 ± 0.68 мм/год с азимутом 73.20° . Таким образом, оценки горизонтальных скоростей смещений в глобальной системе отсчета выявляют кинематическое отличие северной, южной частей Восточного сегмента и Апшеронского полуострова.

Горизонтальные скорости смещений ГНСС-станций в региональной системе отсчета, связанной с неподвижной Евразией, характеризуют локальные, относительные перемещения элементов региональной тектонической структуры. Полученные оценки в северной части Восточного сегмента Большого Кавказа показывают следующие скорости и направления движений основных тектонических структур региона (табл. 2, рис. 4).

1. Согласно оценкам, полученным для 13 станций: ATGI, МАНА, MHCH, BUYN, RHTA, BOTL, HUNZ, LEVA, AKSH, INCH, KASU, MGRM, GADJ (табл. 2, п. 6, 9–17, 20–22), Северный склон Большого Кавказа смещается со среднестатистической горизонтальной скоростью 2.56 ± 1.00 мм/год с азимутом -6.63° (СЗ направление).
2. Станции KZLR, BBYR (табл. 2, п. 1, 2), расположенные перед Северным склоном (рис. 1, зона III) в Терско-Сулакской впадине (рис. 1, зона II₂), смещаются со среднестатистической горизонтальной скоростью 1.24 ± 0.68 мм/год с азимутом -96.95° (ЮЗ направление).
3. Станции GRZN, KNII (табл. 2, п. 4, 5) в Терско-Сунженской складчатой зоне (рис. 1, зона II₁) и станции HASV, KZIL (табл. 2, п. 7, 8), расположенные в контакте Дагестанского клина Северного склона (рис. 1, зона III₂)

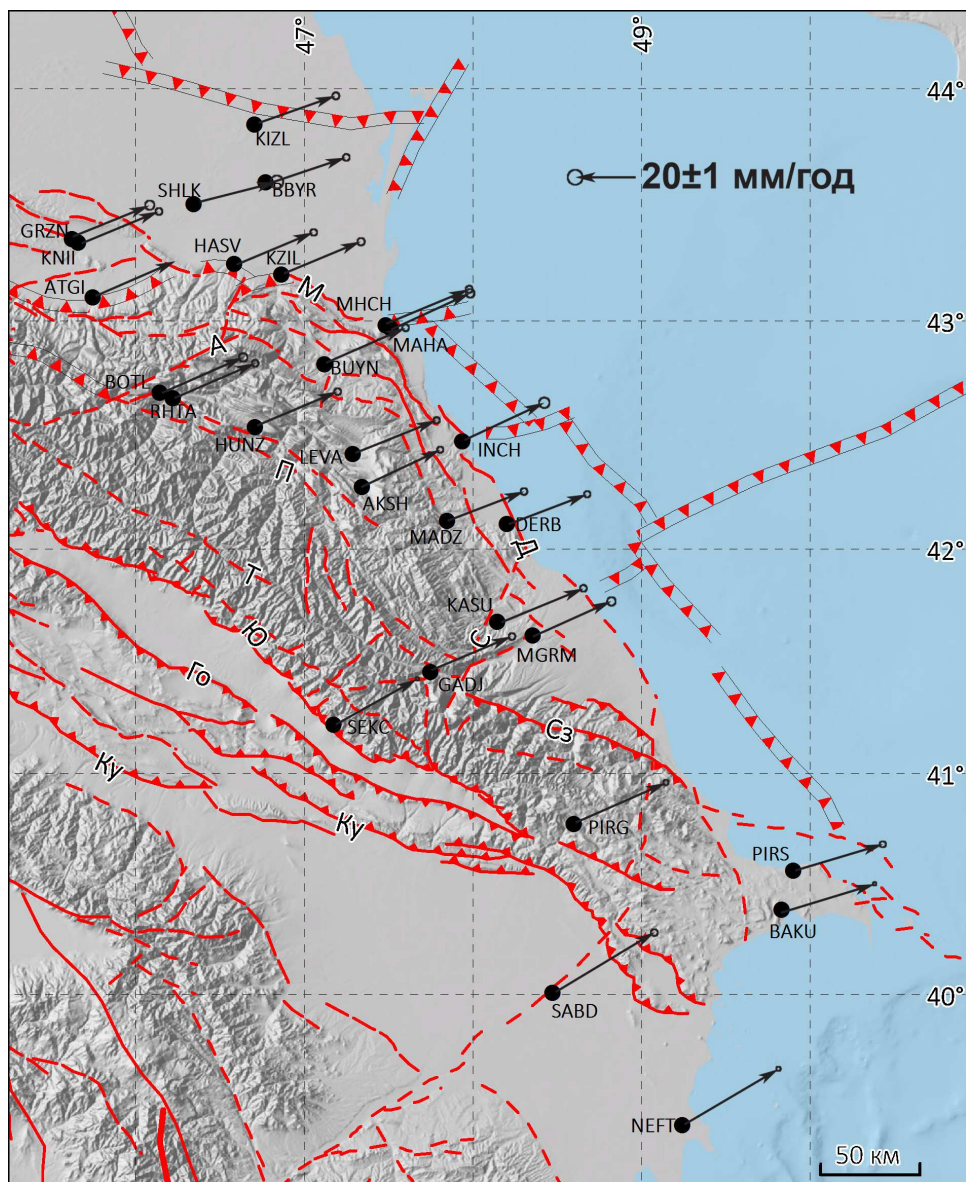


Рис. 3. Векторы скоростей смещений ГНСС-станций в ITRF2020, полученные в результате обработки оригинальных ГНСС-данных станций непрерывных наблюдений, расположенных в Восточном сегменте Большого Кавказа (табл. 1), по методике, изложенной в разделе 2. Численные значения приведены в табл. 2. Расшифровка обозначений приведена в подписи рис. 1

и Терско-Сулакской впадины (рис. 1, зона Π_2) смещаются со среднестатистической горизонтальной скоростью 1.77 ± 1.03 мм/год с азимутом -44.74° (СЗ направление).

4. С восточной стороны Северного склона станции MADZ, DERB (табл. 2, п. 18, 19), расположенные в Терско-Сулакской впадине (рис. 1, зона Π_2), смещаются со среднестатистической горизонтальной скоростью 1.72 ± 0.89 мм/год и азимутом -55.96° (СЗ направление).

Таким образом, в северной части Восточного сегмента мы видим, что тектонический блок Северного склона (рис. 1, зона III), смещаясь в СЗ

направлении, опережает Терско-Каспийский предгорный прогиб в Терско-Сунженской складчатой зоне (рис. 1, зона Π_1) и Терско-Сулакской впадине (рис. 1, зона Π_2), при этом направление смещения последних становится более западно ориентированным.

На Южном склоне станции SEKC и PIRG (табл. 2, пп 23, 24) показывают высокоскоростное смещение (среднестатистическое) 5.49 ± 0.63 мм/год с СВ ориентацией в азимуте 16.49° . При этом Северный склон Большого Кавказа смещается со среднестатистической скоростью 2.56 ± 1.00 мм/год с СЗ ориентацией с азимуте -6.63° . По всей видимости, различие скоростей и направлений смещений Южного и Северного склонов горного сооружения Большого Кавказа компенсируется в Осовой зоне

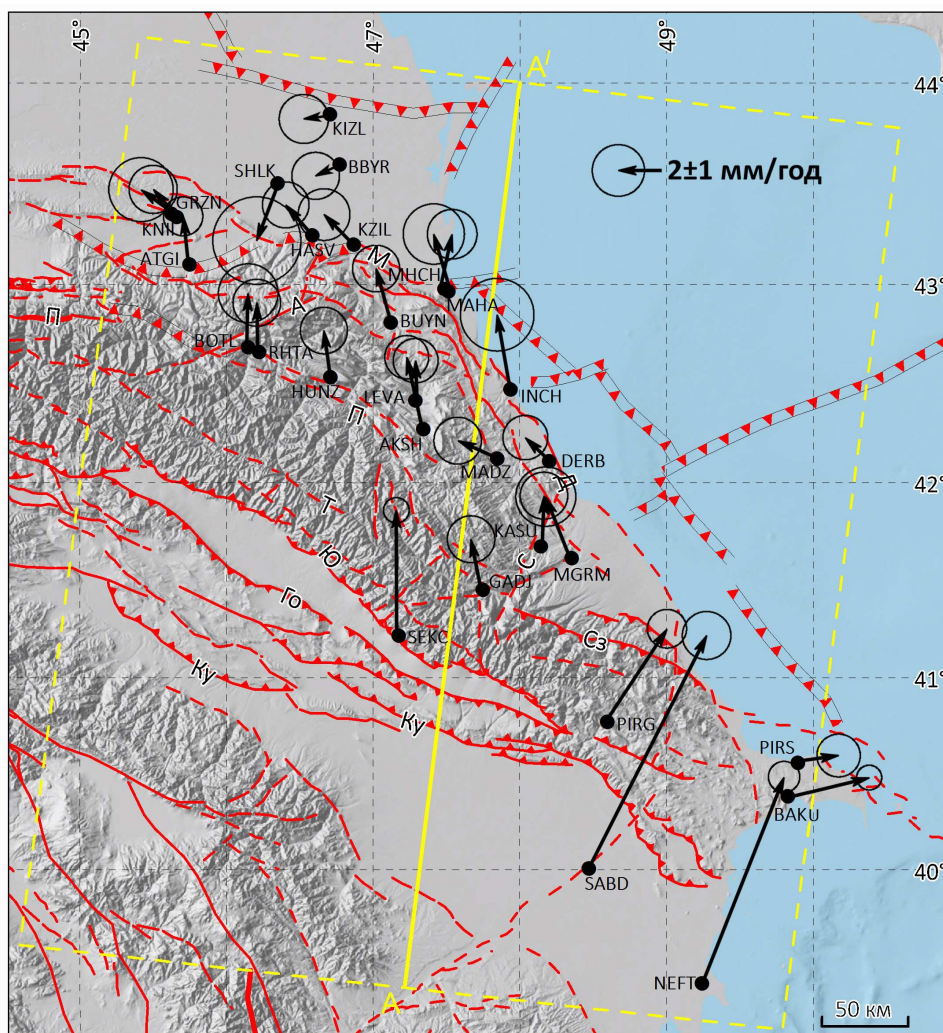


Рис. 4. Векторы скоростей смещений ГНСС-станций в ITRF2014_EURA (относительно неподвижной Евразии), полученные в результате обработки оригинальных ГНСС-данных станций непрерывных наблюдений, расположенных в Восточном сегменте Большого Кавказа (табл. 1), по методике, изложенной в разделе 2. Численные значения приведены в табл. 2. Желтой линией показан профиль скоростей смещений А-А'. Расшифровка обозначений приведена в подписи рис. 1

(рис. 1, зона IV), что должно приводить к интенсивному накоплению тектонических напряжений.

В Куринской межгорной впадине (рис. 1, зона VI) станции SABD и NEFT (табл. 2, п. 27, 28) показывают еще более быстрое смещение (среднестатистическое) 11.33 ± 0.78 мм/год в СВ направлении с азимутом 23.97° . Что, вероятнее всего, является свидетельством высокоинтенсивного поперечного сжатия и предположительного поддвига структур Куринской межгорной впадины в СВ направлении под горное сооружение Большого Кавказа, что согласуется с результатами исследования [8].

В отличие от тектонических структур Южного склона (рис. 1, зона V) и Куринской впадины (рис. 1, зона VI) станции PIRS и BAKU (табл. 2, п. 25, 26) в Апшеронской складчатой зоне (рис. 1, зона VII) смещаются со среднестатистической скоростью 2.85 ± 0.67 мм/год в направлении, близком к восточному с азимутом 79.09° .

3.2. Результаты скоростного профилирования

Результаты профилирования скоростей (табл. 3; рис. 5) показывают более детальную геодинамическую картину. Профиль А-А' имеет общую протяжённость 500 км с юга на север с азимутом 6.58° . Профиль включает все определяемые региональные ГНСС-станции, которые территориально охватывают Терско-Каспийский предгорный прогиб (рис. 1, зона II), Северный склон Большого Кавказа (рис. 1, зона III), Осевую шовно-блоковую зону (рис. 1, зона IV), складчато-надвиговую зону Южного склона (рис. 1, зона V), Куринскую межгорную впадину (рис. 1, зона VI) и Апшеронскую складчатую зону (рис. 1, зона VII).

Для южной части Восточного сегмента характерна следующая кинематическая обстановка.

1. Скорости смещений станций NEFT, SABD (табл. 3, п. 1, 2) относительно станций PIRG,

Таблица 3. Компоненты проекции скоростей на профиль А–А' с азимутом 6.58°: вдоль профиля, поперек и вертикальные. Положительные скорости вдоль профиля имеют северную ориентацию, положительные поперек — западную. Обозначения морфоструктур (Морфо) приведены в соответствии с рис. 1 и 5. Дистанция соответствует положению ГНСС-станции относительно начала профиля

п/п	Морфо.	Код	Дистанция, км	Скорость, мм/год		
				вдоль	поперек	вертикальная
1	VI ₃	NEFT	32.47	10.06±0.60	-2.65±0.60	-6.66±0.62
2		SABD	90.88	11.52±0.93	-4.19±0.93	1.28±1.01
3	VII	BAKU	147.27	1.36±0.48	-3.66±0.48	1.88±0.48
4		PIRS	169.62	0.45±0.83	-1.73±0.83	3.08±0.87
5	V	PIRG	177.73	4.57±0.75	-2.29±0.75	1.49±0.77
6		SEKC	210.60	5.83±0.49	0.69±0.49	-0.70±0.50
7	IV	GADJ	243.00	2.20±0.91	0.71±0.91	0.82±0.98
8	II ₄	MGRM	266.48	2.75±1.15	1.45±1.15	6.50±1.25
9		KASU	271.39	2.34±0.91	0.18±0.91	4.27±0.96
10	III ₂ , II ₃	MADZ	317.35	0.58±0.91	1.82±0.91	5.17±0.98
11		DERB	319.89	0.93±0.86	1.21±0.86	1.32±0.91
12		AKSH	328.62	3.23±0.84	1.09±0.84	1.26±0.87
13		LEVA	344.89	1.74±0.86	0.26±0.86	0.92±0.90
14		HUNZ	353.08	2.00±0.91	0.51±0.91	3.04±0.97
15		INCH	356.49	3.34±1.41	0.98±1.41	6.32±1.65
16		BOTL	362.90	2.23±0.92	0.29±0.92	1.06±0.99
17		RHTA	364.87	2.49±1.15	0.22±1.15	1.99±1.26
18		BUYN	387.00	2.33±0.91	0.93±0.91	3.97±0.96
19		MHCH	402.95	2.77±1.17	1.17±1.17	1.84±1.34
20		MAHA	407.97	2.43±0.96	-0.24±0.96	0.74±1.03
21		ATGI	409.67	2.06±0.76	0.46±0.76	0.67±0.79
22	II ₂ , II ₁	KZIL	426.50	1.27±1.01	1.54±1.01	1.78±1.09
23		HASV	429.90	1.28±0.90	1.40±0.90	-0.01±0.95
24		KNII	434.30	1.11±0.94	1.19±0.94	0.95±1.04
25		GRZN	437.55	0.78±1.25	1.38±1.25	-0.23±1.39
26		SHLK	458.60	-2.98±1.71	0.74±1.71	0.40±2.15
27		BBYR	470.18	-0.66±0.92	1.08±0.92	-4.70±1.00
28		KZLR	496.91	-0.29±0.96	1.20±0.96	-6.40±1.01

SEKC (табл. 3, п. 5, 6) вдоль профиля А–А' (рис. 5, верхняя панель а) показывают высокоскоростное сближение тектонической структуры Куринской межгорной впадины (рис. 1, зона VI) с Южным склоном (рис. 1, зона V).

2. Скорости поперек профиля А–А' (рис. 5, средняя панель б) показывают отдаление станции SEKC (табл. 3, п. 6) от станций NEFT, SABD, PIRG (табл. 3, п. 1, 2, 5).

Данная кинематическая особенность показывает поперечное сокращение и продольное растяжение Куринской межгорной впадины относительно Южного склона горного сооружения Большого Кавказа.

1. Вертикальные скорости смещений (рис. 5, нижняя панель в) показывают слабоинтенсивное поднятие станций SABD, PIRG (табл. 3, п.

2, 5), а для станции SEKC, NEFT (табл. 3, п. 6, 1) — относительное опускание.

При горизонтальном поперечном сокращении и продольном растяжении территории Куринской впадины (рис. 1, зона VI) происходит её слабоинтенсивное воздымание в центральной части и опускание в контактной области Южного склона (рис. 1, зона V) и Алазанской впадины (рис. 1, зона VI₁) Куринской депрессии. Высокоинтенсивное опускание станции NEFT трактовать в рамках общей геодинамической схемы проблематично, т.к. Нефтячалы является районом нефте- и газодобычи.

Для северной части Восточного сегмента отмечается следующее.

1. Скорости смещений ГНСС-станций GADJ, AKSH, LEVA, HUNZ, BOTL, RHTA, BUYN, ATGI (табл. 3, п. 7, 12, 13, 14, 16, 17, 21) вдоль профиля А–А' (рис. 5, верхняя панель

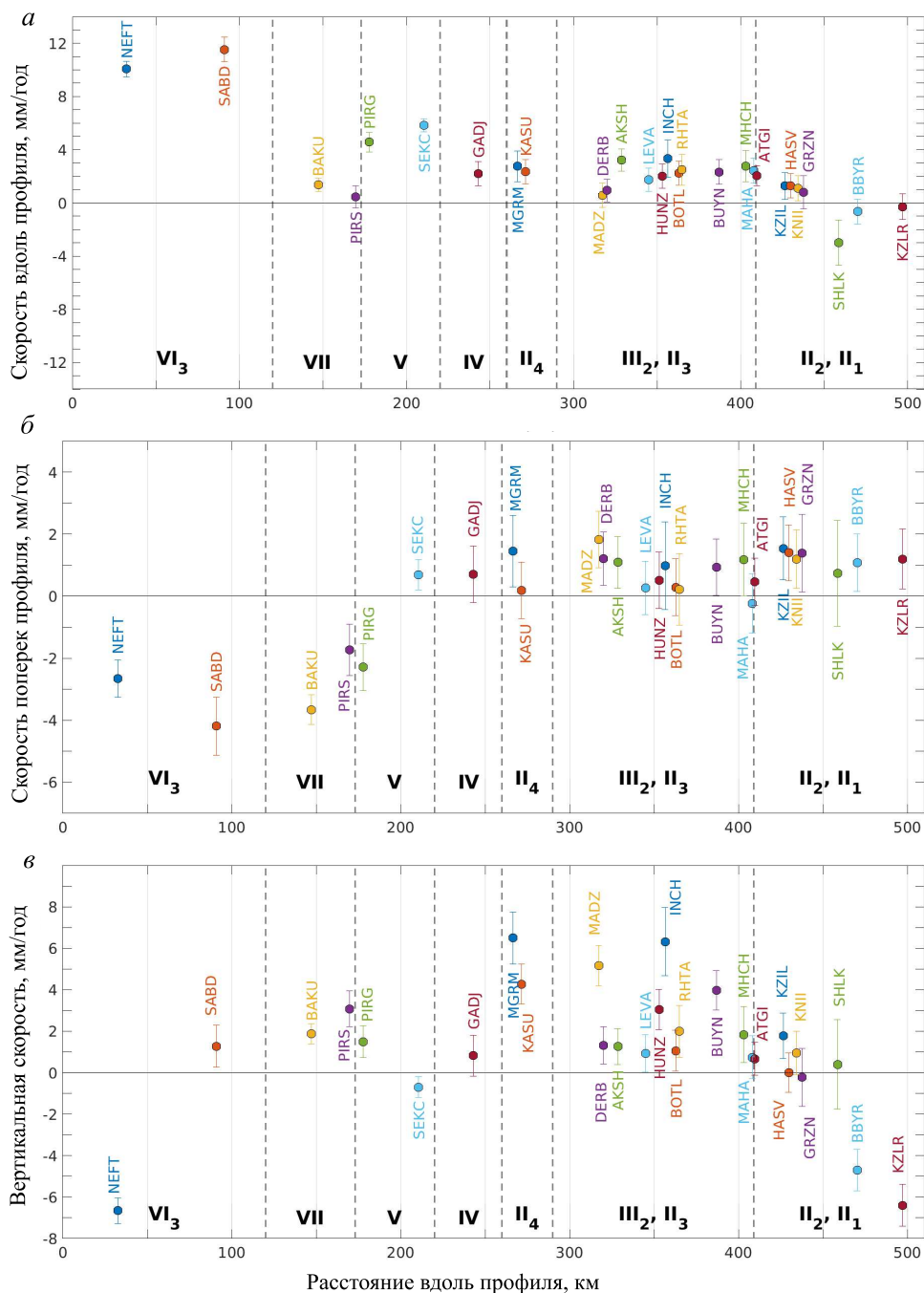


Рис. 5. Скоростные профили: *a* — верхняя панель — проекции скоростей смещения вдоль профиля А–А'; *б* — средняя панель — проекции скоростей поперек профиля А–А'; *в* — нижняя панель — вертикальные скорости. Вертикальными пунктирными линиями и римскими цифрами обозначены региональные морфоструктуры. Расшифровку обозначений см. в подписи к рис. 1

a) показывают, что тектонические структуры Осовой зоны (рис. 1, зона IV) и Северного склона (рис. 1, зона III) смещаются с примерно одинаковыми скоростями в пределах 2 – 3 мм/год. Станций KZIL, HASV, KNII, GRZN (табл. 3, п. 22–25) показывают, что при переходе от Северного склона к Терско-Сулакской впадине (рис. 1, зона II₂) скорости смещения вдоль профиля снижаются до 1 мм/год. Непосредственно внутри Терско-Сулакской впади-

ны скорости смещений вдоль профиля меняют знак и составляют около –0.5 мм/год.

2. В Осовой зоне (рис. 1, зона IV), на Северном склоне (рис. 1, зона III) и внутри Терско-Сулакской впадины (рис. 1, зона II₂) смещения поперек профиля А–А' (рис. 5, средняя панель *б*) происходят со скоростями 0.5 – 1.0 мм/год в западном направлении. При переходе от Северного склона к Терско-Сулакской впадине поперечные скорости увеличиваются

до 1.2 – 1.5 мм/год, направление остается западное.

3. Вертикальные скорости смещений (рис. 5, нижняя панель *в*) показывают, что в целом Осовая зона (рис. 1, зона IV) и Северный склон (рис. 1, зона III) испытывают поднятие в пределах 1 мм/год. А структура Терско-Сулакской впадины (рис. 1, зона II₂) испытывает относительное опускание с скоростью –5.6 мм/год.

Таким образом, в северной части Восточного сегмента Большого Кавказа происходит надвиг тектонических структур Северного склона (рис. 1, зона III) на Терско-Сулакскую впадину (рис. 1, зона II₂).

Особое внимание заслуживают ГНСС-станции MGRM, KASU, MADZ, DERB, INCH, MNCH и МАНА (см. табл. 3, п. 8–11, 15, 19, 20), размещённые в Избербаш-Дербентской складчатой зоне и Кусаро-Дивичинской впадине (рис. 1, зоны II₃ и II₄). Горизонтальные и особенно вертикальные скорости смещений данных ГНСС-станций демонстрируют значительные отличия от скоростей движения тектонических структур Осовой зоны (рис. 1, IV) и Северного склона (зона III). Эти различия усложняют построение единой геодинамической модели для Восточного сегмента Большого Кавказа и требуют дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты комплексного исследования геодинамических особенностей Восточного сегмента Большого Кавказа позволили представить следующую схему геодинамической обстановки региона. Современные движения северной и южной

частей Восточного сегмента Большого Кавказа существенно различаются по интенсивности. Южная часть в целом смещается быстрее по сравнению с северной. Различия в скоростях компенсируются в Осовой зоне горного сооружения Большого Кавказа, что приводит к накоплению тектонических напряжений и в последующем формированию условий для возникновения сейсмических событий.

В южной части Восточного сегмента Куринская межгорная впадина испытывает поперечное сокращение и продольное растяжение относительно Южного склона Большого Кавказа. Также заметно разнонаправленное вертикальное движение её частей: в центральной части Куринская впадина испытывает слабоинтенсивное воздымание, а на западном крыле, в области контакта Южного склона и Алазанской впадины, происходит её опускание. Полученные результаты согласуются с концепцией предположительного поддвига структур Куринской межгорной впадины в СВ направлении под горное сооружение Большого Кавказа [8].

В северной части Восточного сегмента установлено, что в результате взаимных перемещений происходит надвиг тектонических структур Северного склона на Терско-Сулакскую впадину.

Результаты, полученные в данном исследовании, детализируют общую геодинамическую обстановку Большого Кавказа.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы выражают глубокую благодарность компаниям Навгеоком, ПРИН и НПК «Индустриальные геодезические системы» за предоставленный доступ к данным ГНСС-станций.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова, государственного задания Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН и государственного задания Владикавказского научного центра РАН.

- [1] Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2-х т. М.: Картгеоцентр. Т. 1. 2005, Т. 2. 2006.
- [2] Булаева Н.М., Романов Н.Т., Халилов А.Г. и др. // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. № 2(3). 88 (2008)
- [3] Габсатарова И.П., Пономарева Н.Л., Королецки Л.Н., Ахмедова М.М. // [Российский сейсмологический журнал](#). 1, № 1. 46 (2019). (*Gabsatarova I.P., Ponomareva N.L., Koroletski L.N., Akhmedova M.M. // Russian Journal of Seismology*. 1(1). 46 (2019) (In Russ.).)
- [4] Габсатарова И.П., Пономарева Н.Л., Ахмедова М.М. // [Российский сейсмологический журнал](#). 7, № 3. 75 (2025). (*Gabsatarova I.P., Ponomareva N.L., Akhmedova M.M. // Russian Journal of Seismology*. 7(3). 75 (2025) (In Russ.).)
- [5] Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н. // [Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса](#). 16, № 5. 138 (2019).
- [6] Дотдугев С.И. // [Геотектоника](#). № 3. 59 (1990).
- [7] Етирмишли Г.Д., Маммадли Т.Я., Рогожин Е.А., Сысолин А.И. // [Геофизические процессы и биосфера](#). 18, № 2. 82 (2019). (*Yetirmishli G.J., Mammadli T.Y., Rogozhin E.A., Sysolin A.I. // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 55, 870-883. (2019)).
- [8] Етирмишли Г.Д., Рзаев А.Г., Казымов И.Э. и др. // [Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН](#). № 2. 1 (2018).
- [9] Етирмишли Г.Д., Исмаилова С.С., Казымова С.Е. // [Геология и геофизика Юга России](#). 11, № 4. 58 (2021). (*Yetirmishli G.J., Ismailova S.S., Kazimova S.E. // Geology and Geophysics of Russian South*. 11, N 4. 58 (2021)).
- [10] Етирмишли Г., Казымов И.Э. // [Российский сейсмологический журнал](#). 5, № 2. 7 (2023).

- [11] Идрисов И.А. // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. № 2 (15). 102 (2011).
- [12] Кадилов Ф.А., Сафаров Р.Т. // ANAS Transactions, Earth Sciences. N 1. 47 (2013).
- [13] Кадилов Ф.А., Гулиев И.С., Фейзуллаев А.А. и др. // Физика Земли. № 6. 1 (2014).
- [14] Кенгерли Т.Н., Кадилов Ф.А., Етирмишли Г.Д. и др. // Геодинамика и тектонофизика. 9, № 4. 1099 (2018). (Kangarli T.N., Kadirov F.A., Yetirmishli G.J. et al. // Geodynamics & Tectonophysics. 9(4). 1099 (2018)).
- [15] Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М: Наука. 506 с. 1977
- [16] Корженков А.М., Чилиев В.Т., Ларьков А.С. и др. // Вопросы инженерной сейсмологии. 50, № 2. 76 (2023).
- [17] Лаврищев В.А., Шейков А.А., Андреев В.М. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Скифская. Лист К-37 (Сочи), К-38 (Махачкала), К-39. Объяснительная записка. СПб: Карт. фабрика ВСЕГЕИ. 431 с. (2011).
- [18] Магомедов Р.А., Идрисов И.А. Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Ессентуки, 2017. с. 133-139.
- [19] Магомедов Р.А., Мусаев М.А. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. № 4 (87). 15 (2021).
- [20] Маммадлы Т.Я., Рогожин Е.А. // Вопросы инженерной сейсмологии. 45, № 2. 21 (2018). (Mammadli T.Y., Rogozhin E.A. // Seism. Instr. 55. 220 (2019)).
- [21] Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968.
- [22] Милоков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. // Геотектоника. № 3. 56 (2015). (Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblou G.M. // Geotectonics. 49(3). 210 (2015)).
- [23] Милоков 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)).
- [24] Милоков 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)).
- [25] Миронов А.П., Милоков В.К., Стеблов Г.М. Современные движения Северного Кавказа и Крыма по GPS наблюдениям. В сб. «Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов всероссийской конференции» в 2-х томах. М.: ИФЗ РАН. 1. 168 (2016)
- [26] Миронов А.П., Милоков В.К., Овсяченко А.Н. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 81, № 1. 2610802 (2026).
- [27] Никитин М.Ю. // Бюлл. МОИП, отд. геол. 62, Вып. 3. 21 (1987).
- [28] Никонов А.А. // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. № 9. 90 (1982).
- [29] Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А., Зайцева Н.В., Лукашова Р.Н. // Вопросы инженерной сейсмологии. 40, № 1. 47 (2013).
- [30] Овсяченко А.Н., Корженков А.М., Гаджиев М.С. и др. // Доклады РАН. Научи о Земле. 493, № 1. 63 (2020). (Ovsyuchenko A.N., Korzhenkov A.M., Gadzhiev M.S. et al. // Doklady Earth Sciences. 493. 535 (2020).)
- [31] Овсяченко А.Н., Едемский Е.Д., Корженков А.М. и др. // Геология и Геофизика Юга России. 15, № 4. 78 (2025). (Ovsyuchenko A.N., Edemsky E.D., Korzhenkov A.M. et al. // Geology and Geophysics of the South of Russia. 15, N 4. (2025)).
- [32] Ребецкий Ю.Л. // Геодинамика и тектонофизика. 11, № 1. 17 (2020). (Rebetsky Yu.L. // Geodynamics & Tectonophysics. 11(1). 17 (2020)).
- [33] Рогожин Е.А., Арефьев С.С., Богачкин Б.М. и др. // Физика Земли. № 3. 70 (1993).
- [34] Рогожин Е.А., Гурбанов А.Г., Мараханов А.В. // Физика Земли. № 3. 33 (2005).
- [35] Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И. и др. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, (2014).
- [36] Рогожин Е.А., Милоков В.К., Миронов А.П. и др. // Геология и геофизика Юга России. № 4. 141 (2018).
- [37] Рогожин Е.А., Милоков 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)).
- [38] Соборнов К.О. // Геотектоника. № 3. 34 (1991).
- [39] Черкашин В.И., Сабаниев К.А., Гаврилов Ю.О., Панов Д.И. Тектоническая карта Дагестана. М. 1:500 000. (Объяснительная записка). Труды Института геологии Дагестанского НЦ РАН. Вып. 60. Махачкала: АЛЕФ. 130 с. 2012.
- [40] Трифонов В.Г. Позднечетвертичный тектогенез. М.: Наука, 1983.
- [41] Шолто В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А. Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука, 1993.
- [42] Яценко В.Р., Ямбаев Х.К. Геодезический мониторинг движений земной коры (по материалам Кавказского региона). М.: МИИГАиК, 2007.
- [43] Altamimi Z., Metivier L., Collilieux X. // J. Geophys. Res. 117. B07402 (2012).
- [44] Bock Y., Melgar D. // Reports on Progress in Physics. 79(10). 106801 (2016).
- [45] Dong D., Fang P., Bock Y. et al. // J. Geophys. Res. Solid Earth. 107(B4). ETG9 (2002).
- [46] Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A. et al. // EarthScience Reviews. 207. 103222 (2020).
- [47] Gomez J.M., Bukchin B., Madariaga R., Rogozhin E.A. // Geophys. J. Int. 129, N 129. 613 (1997).
- [48] Heflin M., Donnellan A., Parker J. et al. // Earth and Space Sci. 7(7). e2019EA000644 (2020).
- [49] Herring T.A. // GPS Solutions. 7(3). 194 (2003).
- [50] Herring T.A., King R.W., McClusky S. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS-analysis program, Release 10.4. Cambridge: Dept. of Earth Atmos. and Planet. Sci.; Mass. Inst. of Technol. 91 p. 2010.
- [51] Herring T.A., King R.W., McClusky S. Introduction to GAMIT/GLOBK, Release 10.7. Cambridge: Mass. Inst. of Technol. 54 p. 2018.
- [52] Kadirov F., Mammadov S., Reilinger R., McClusky S. // ANAS Transactions, Earth Sciences. № 1. (2008).
- [53] Kadirov F., Floyd M., Alizadeh A. et al. // Natural Hazards. 63. 997 (2012).
- [54] Kadirov F., Yetirmishli G., Safarov R. et al. // ANAS Transactions, Earth Sciences. 1. 28 (2024).

- [55] McClusky S., Balassanian S., Barka A. et al. // *J. Geophys. Res.* **105**. 5695 (2000).
- [56] Milyukov V., Kopaeв A., Zharov V. et al. // *Journal of Geodynamics.* **49**(3-4). 216 (2010).
- [57] Nikolaidis R. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System. University of California, San Diego. ProQuest Dissertations & Theses. 3148254. 2002.
- [58] Pierce I., Guliyev I., Yetirmishli G.J. et al. // *Tectonics.* **43**. e2023TC007758 (2024).
- [59] Reilinger R., McClusky S., Vernant P. et al. // *J. Geophys. Res.* **111**. B05411 (2006).
- [60] Sokhadze G., Floyd M., Godoladze T. et al. // *Earth and Planetary Science Letters.* **481**. 154 (2018).
- [61] Strom A.L. // *Reliability: Theory & Applications. Special Issue.* **18**, N 5(75). 118 (2023).
- [62] Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O. et al. // *Journal of Asian Earth Sciences.* **188**. 104108. (2020).
- [63] Tibaldi A., Bonali F.L., Pasquarè Mariotto F. et al. // *Journal of Structural Geology.* **180**. 105085 (2024).
- [64] Trikhunkov Y.I., Kangarli T.N., Bachmanov D.M. et al. // *Quaternary International.* **605-606**. 349 (2021).
- [65] Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T. et al. // *Earth System Science Data.* **14**. 4489 (2022).

Geodynamics of the Eastern Segment of the Greater Caucasus based on GNSS Observations

A. P. Mironov^{1,a}, V. K. Milyukov¹, A. N. Ovsyuchenko², A. S. Larkov², Kh. M. Khubaev³

¹*Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University (SAI MSU), Moscow, 119922 Russia*

²*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995 Russia*

³*Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences*

Republic of North Ossetia–Alania, 363110, Russia

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

The paper presents the results of a comprehensive study of the geodynamic features of the Eastern Segment of the Greater Caucasus, based on original long-term quasi-continuous satellite-geodetic observations at 28 regional Global Navigation Satellite System (GNSS) stations. The GNSS measurements were processed using the GAMIT/GLOBK software package, designed for high-precision geodetic determinations from radio-navigation satellite signals. As a result of the processing, time series of coordinate increments and displacement velocities of the GNSS stations were obtained in two reference frames, the global ITRF2020 and a regional frame, relative to stable Eurasia. To study the relative displacements of regional tectonic structures, the method of velocity profiling was applied. A 500 km-long profile was selected, extending from south to north with an azimuth of 6.58°. The profiling results revealed relative motions of the main regional tectonic structures. Interpretation of the obtained results in the context of regional seismotectonics provides a detailed picture of the present-day geodynamic situation of the Eastern Segment of the Greater Caucasus.

PACS: 91.10.Kg; 91.30.Px

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

Received 08 April 2026.

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

Сведения об авторах

1. Миронов Алексей Павлович — науч. сотрудник; e-mail: almir@physics.msu.ru
2. Милуков Вадим Константинович — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; e-mail: vmilyukov@yandex.ru
3. Овсюченко Александр Николаевич — канд. геолого-минералогических наук, зав. лабораторией; e-mail: ovs@ifz.ru
4. Ларьков Александр Сергеевич — канд. геолого-минералогических наук, зав. лабораторией; e-mail: las119@yandex.ru
5. Хубаев Харитон Майорович — науч. сотрудник.