УДК 551.24

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА И ПРЕДКАВКАЗЬЯ ПО ГНСС НАБЛЮДЕНИЯМ

© 2022 г. В. К. Милюков¹, А. П. Миронов^{1, *}, А. Н. Овсюченко²,

А. В. Горбатиков², Г. М. Стеблов^{2, 4}, А. М. Корженков², В. Н. Дробышев³,

X. M. Хубаев³, A. O. Агибалов², A. A. Сенцов², U. Dogan⁵, S. Ergintav⁶

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга —

МГУ им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ), д. 13, Университетский просп., 119234 Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН),

д. 10, Б. Грузинская ул., 123242 Москва, Россия

³Владикавказский научный центр Российской академии наук (ВНЦ РАН),

д. 22, ул. Маркуса, 362027 Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, Россия

 $^4 \Phi$ едеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба"

Российской академии наук (ФИЦ ЕГС РАН), д. 189, просп. Ленина, 249035 Обнинск, Калужская обл., Россия

⁵Yildiz Technical University, Department of Geomatics Enginering, Davutpasa Kampusu 34220 Esenler/Istanbul, Turkey

⁶Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute,

34684 Çengelköy-İstanbul, Turkey

*e-mail: almir@list.ru

Поступила в редакцию 24.09.2021 г. После доработки 13.10.2021 г. Принята к публикации 02.02.2022 г.

Представлено поле скоростей Западного Кавказа и Предкавказья, полученное по результатам наблюдений на ГНСС станциях, которое в отсчетной основе ITRF2014 показывает согласованное движение региона в север-северо-восточном направлении со скоростью 27-28 мм/год. В системе отсчета относительно неподвижной Евразии выделен ряд геодинамических особенностей основных тектонических структур региона. В северной части региона наблюдается всерообразный рисунок векторов горизонтальных скоростей, отражающий врашение северного крыла Северо-Азовской флексурно-разрывной зоны против часовой стрелки и, соответственно, современные сдвиговые смещения. Для детализации геодинамической обстановки проведено сопоставление скоростей современных движений земной коры, полученных по двум геодезическим профилям, и данным региональной сейсмотектоники. Олин профиль пересекает в юго-запалном-северо-восточном направлении основные геологические структуры региона – горное сооружение Западного Кавказа, Западно-Кубанский передовой прогиб и Скифскую плиту. Другой профиль, менее протяженный, пересекает все горное сооружение Западного Кавказа, Западно-Кубанский передовой прогиб и часть моноклинали Центрального сектора Северного Кавказа. В пределах Большого Кавказа и Западно-Кубанского прогиба наблюдается поперечное сжатие основных морфоструктур со скоростью до 1 мм/год, в Предкавказье преобладают сдвиговые смещения. Горное сооружение Западного Кавказа находится в условиях продольного сжатия. Восточнее Туапсинской зоны разломов горное сооружение испытывает продольное растяжение. При этом интенсивность деформационных процессов на Южном склоне выше, чем в Предкавказье. В настоящее время на Западном Кавказе наблюдается низкий и умеренный уровень сейсмической активности.

Ключевые слова: Северный Кавказ, Предкавказье, современные движения земной коры, геодинамика, спутниковая геодезия, глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) **DOI:** 10.31857/S0016853X22010052

введение

Спутниковая геодезия в настоящее время широко используется в изучении современных тектонических движений, однако Западный Кавказ пока остается слабо изученным регионом. В настоящей статье к Западному Кавказу и Предкавказью отнесена часть горной системы Большого Кавказа и прилегающая к ней на севере равнинная территория, которые расположены к западу от меридиональной линии, проходящей через гору Эльбрус. В этом регионе с юго-запада на северовосток выделяются следующие крупнейшие тектонические структуры:

Туапсинский прогиб со стороны Черного моря;

 Южный склон, Осевая зона, Северный склон горного сооружения Западного Кавказа;

 Западно-Кубанский передовой прогиб, примыкающий к Северному склону;

 – Скифская плита и прилегающие области Восточно-Европейской платформы.

Структурные контакты представляют системы разломов и флексурно-разрывные зоны [7, 14, 18, 24, 28, 31].

К настоящему времени проведены многочисленные геологические и геофизические исследования горного сооружения Западного Кавказа и примыкающих территорий. При этом постоянные спутниково-геодезические наблюдения в этом регионе проводятся только в течение последних нескольких лет. В отличие от центрального, южного, юго-восточного секторов Большого Кавказа и Закавказья, западный сектор до сих пор остается регионом со слабо изученным режимом современных горизонтальных движений [15–17, 25, 30, 38–43].

Начиная с середины 2010-х гг., усилиями компаний ООО "Гексагон Геосистемс Рус" (г. Москва, Россия), ООО "Геостройизыскания" (ГСИ) (г. Москва, Россия), ООО "ЮжГеоСеть" (г. Ростов-на-Дону, Россия), ООО "ЕFT-CORS" (г. Москва, Россия) были созданы и технически поддержаны сети базовых станций глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) на Большом Кавказе и Предкавказье. В рамках научно-технического сотрудничества компаний и ГАИШ МГУ (г. Москва, Россия) данные измерений 24-х ГНСС станций поступают на сервер ГАИШ МГУ и используются в данной работе [46].

Помимо российских коммерческих сетей на Северном Кавказе проводят многолетние непрерывные измерения ГНСС станции российских и международных научных организаций International GNSS Service (IGS Central Bureau, NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, USA), EUREF Permanent GNSS Network (Royal Observatory of Belgium, Brussels, Belgium), ГАИШ МГУ (г. Москва, Россия), ФИЦ ЕГС РАН (г. Обнинск. Калужская обл., Россия). ВНЦ РАН (г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, Россия), расположенные в Центральном секторе Северного Кавказа. И в силу того, что их координаты и скорости смещения определены с высокой точностью, они используются в качестве базовых для обработки станций коммерческих сетей.

Детальные исследования современных движений Кавказа вдоль профилей, ориентированных вкрест простирания морфоструктур, т.е. тектонических структур, выраженных в рельефе и деформациях неоген-четвертичных геоморфологических уровней, позволяют охарактеризовать не только движения на иерархическом уровне всего подвижного пояса, но и локальные тектонические процессы, определяющие динамику конкретных структур. Этот подход позволил провести первые детальные исследования современной геодинамики в Осетинской части Большого Кавказа, где были выявлены значительные вариации горизонтальных скоростей в зонах активных разломов [16, 25]. Под приподнятой частью центрального сегмента Большого Кавказа по геофизическим данным было выявлено низкоскоростное тело, которое может быть сопоставлено с относительно легким, низкодобротным объемом земной коры, соответствующее области максимального воздымания на позднеорогенном этапе и максимального уменьшения поперечного сжатия по данным ГНСС измерений [17].

Целью нашей статьи является уточнение геодинамики основных тектонических структур региона Западного Кавказа и Предкавказья на основе сопоставления скоростей современных горизонтальных движений с геологическим строением региона.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Геологическое строение тектонических структур Западного Кавказа и Предкавказья во многом сформировано в позднем плиоцене—эоплейстоцене, когда произошло оформление гор Западного Кавказа в современном виде, а опускание и осадконакопление распространились на впадины вдоль всего Предкавказья, включая Западно-Кубанский прогиб [2, 14, 18]. Позднеплиоцен—четвертичные осадочные толщи повсеместно перекрывают нижележащие слои со стратиграфическим, а в предгорьях — с угловым несогласием. В неоплейстоцене площади осадконакопления начали сокращаться за счет вовлечения предкавказских участков прогибов в поднятия и складчатые деформации.

В настоящее время на Западном Кавказе наблюдается низкий и умеренный уровень сейсмической активности, но в зонах активных разломов изучены следы сильных палеоземлетрясений, сосредоточенные в Осевой зоне и на Южном склоне Кавказа [21, 24]. На северном склоне Западного Кавказа позднеголоценовые тектонические смещения изучены нами на юго-восточном сегменте Ахтырской разломной зоны.

С помощью архео-сейсмологического метода были выявлены следы сильных землетрясений

также на археологических памятниках Западного Кавказа и Таманского полуострова [11].

Согласно полученным нами данным, сильные сейсмические события происходят в регионе исследования один раз в несколько сот лет, эпицентральные зоны располагаются в сейсмогенерирующих зонах в акватории Черного моря или на суше.

Большой Кавказ

Горное сооружение Западного Кавказа в поперечном сечении представляет собой асимметричный свод. Продольную зональность тектонического строения определяют четыре основные зоны (рис. 1):

- зона Южного склона;

- Осевая зона;
- зона Северного крыла;

 – зона Предкавказского (Западно-Кубанского) прогиба.

Поперечная зональность не менее, а возможно, и более контрастна, чем продольная зональность. Узкий и крутой Южный склон обусловил резкую асимметрию Кавказа в поперечном сечении. Продольное резкое погружение вершинного яруса рельефа, морских террас, поверхностей выравнивания и фундамента на Западном Кавказе происходит по основным ступеням [14, 18]:

- Пшехско-Адлерская;
- Туапсинская;
- Анапская.

В пределах этих широких ступеней рассеяны короткие (первые километры) поднеголоценовые сдвиги (левосторонние в случае Туапсинской зоны) и сдвиго-взбросы. В качестве основной причины возникновения крупных морфоструктурных ступеней рассматривается наличие поперечного глубинного структурного барьера на пересечении с фронтом латерального тектонического потока, направленного из наиболее поднятого, сжатого и деформированного ядра Центрального Кавказа [10, 23, 24].

Современную активность складчато-надвиговой зоны Южного склона Большого Кавказа со всей очевидностью показало Рача-Джавское землетрясение 1991 г. с M = 6.9-7.2 и интенсивностью в эпицентре $I_0 = 8-9$ баллов – сильнейшее за всю историю инструментальных сейсмических наблюдений на Кавказе. Очаг землетрясения отразил основную тенденцию современного геологического развития региона – надвигание южного склона Большого Кавказа на Дзирульский выступ фундамента Закавказского срединного массива вдоль пологой плоскости на глубине 5-10 км [25]. В Туапсинском прогибе складчато-надвиговая зона Южного склона на инструментальном этапе наблюдений показывает умеренную сейсмическую активность (M < 6.0). Для анализа современных тектонических деформаций представляет интерес главный толчок Сочинского роя землетрясений 1970—71 гг. (04.12.1970 с M = 5.1), который ощущался в г. Сочи с интенсивностью I = 6-7 баллов. В пос. Лоо, расположенном на побережье Черного моря в Лазаревском районе г. Сочи, во время главного толчка было отмечено вертикальное смещение (поднятие) на 45 см [1].

Механизмы очагов землетрясений на Южном склоне Западного Кавказа имеют надвиговую или правосдвиговую кинематику смещений вдоль плоскостей северо-западного простирания, которая сменяется на более разнообразную кинематику вдоль поверхностей северо-восточной ориентировки [4, 33]. Очаги северо-восточного простирания сконцентрированы преимущественно в Анапской и Туапсинской флексурно-разрывных зонах.

Осевая зона Западного Кавказа, где выходят на поверхность древнейшие образования, сформировалась вдоль зон крупнейших разломов Краснополянского, Бекишейского, Семигорского и зоны Главного Кавказского надвига, сопровождаемых наиболее напряженной складчатостью альпийского комплекса [14, 32]. В доорогенной складчатой структуре в этих зонах отмечаются правые сдвиги, существенная содвиговая компонента деформаций, следы расплющивания, тектонического течения и более крупномасштабные явления глубинного диапиризма и структурной дисгармонии в относительно пластичных толщах средней юры, нижнего мела и палеогена [23].

Новейшая тектоническая структура Осевой зоны осложнена цепочками депрессионных понижений, вытянутых вдоль Главного Кавказского хребта [18]. Эти депрессии заложены в осевых частях наиболее сжатых антиклиналей. В разрезе они имеют вид рампов или грабенов, тогда как разделяющие их хребты в мезозойских толщах часто имеют синклинальное строение. Такие сочетания синклинальных хребтов и антиклинальных впадин формируют обрашенный тип морфоструктуры. В качестве механизмов ее формирования предложено совокупное действие избирательной денудации, послойного взбрасывания и выжимания в условиях латерального сжатия и продолжающегося развития складок [27]. Современную активность депрессий Осевой зоны подтверждают данные о современных землетрясениях — Чхалтинское 1963 г. с M = 6.4, Бхыбское 1968 года с *M* = 4.5 и Домбайское 2013 года с *M* = 5.1, произошедшие в Бзыбско-Чхалтинской депрессии и многочисленные более слабые события.





Эпицентры землетрясений, по [46]; цифровая модель рельефа, по [36]; диаграммы механизмов очагов в нижней полусфере, по [4, 33].

Показаны (штрих-линии белым) границы крупнейших морфоструктур.

Обозначены (римские цифры и буквы на латинице) структуры:

І – Восточно-Европейская платформа; ІІ – Скифская плита (ІІа – кряж Карпинского; ІІб – Манычский прогиб; ІІв – Азовский выступ; ІІг – платформенное крыло Азово-Кубанской впадины; ІІд – Ставропольский свод); ІІІ – орогенное сооружение Большого Кавказа (ІІІа – Керченско-Таманская складчатая зона; ІІІб – Западно-Кубанский передовой прогиб; ІІІв – моноклинальная зона Северного крыла; ІІІг – Осевая шовная зона; ІІІб – Западно-Кубанский передовой прогиб; ІІІв – моноклинальная зона Северного крыла; ІІІг – Осевая шовная зона; ІІІб – Западно-Кубанский передовой прогиб; ІІІв – туапсинский передовой прогиб); ІV – Черноморская глубоководная впадина). Обозначены (на кириллице): *разломы:* ГК – Главный Кавказский, С – Семигорский, М – Монастырский, Кр – Краснополянский; *системы* разломов: Піп – Пішехско-Адлерская, Ту – Туапсинская, Чн – Черноморская; *флексурно-разрывные зоны:* Ах – Ахтырская; А-К – Анастасиевско-Краснодарская; Но – Новотитаровская; Бе – Березанская; Ей – Ейская; Ма – Манычская; С-А – Северо-Азовская. *1*–*5* – активные геологические структуры: *1* – сбросо-сдвиги и сбросы (бергштрихи направлены в сторону опущенного крыла); *2* – преимущественно сдвиги; *3* – взбросы и надвиги (бергштрихи направзоны: (бергштрихи направлены в сторону опущенного крыла).

Северное крыло Большого Кавказа гораздо более пологое, чем южное. В новейшей структуре оно имеет вид моноклинали, испытывающей ступенчатое погружение в северном направлении. С севера оно ограничивается зоной Ахтырского разлома, по которой происходит погружение и надвигание складчатого фундамента на осадки Западно-Кубанского передового прогиба. По геофизическим данным в фундаменте надвиг принимает крутое падение под горное сооружение [3, 7, 31]. Вдоль простирания Ахтырской зоны взбросы в кайнозойских отложениях обнаруживают изменчивость в направлении падения, образуя "пропеллерную" структуру, характерную для разломных зон с общей сдвиговой кинематикой смещений. На инструментальном этапе сейсмологических наблюдений разлом проявил низкую активность, однако на его центральном сегменте нами были изучены четко выраженные следы голоценовых сейсмотектонических смещений.

Предкавказье

Сочленение Кавказского горного сооружения со Скифской эпигерцинской плитой происходит посредством глубокого Западно-Кубанского передового прогиба, входящего в цепочку Предкавказских передовых депрессий, испытывающих интенсивное прогибание вплоть до настоящего времени. Прогиб представляет собой резко асимметричную структуру, сформировавшуюся уже в конце миоцена, с амплитудой прогибания до 700 м [14]. Его крутое и узкое южное крыло прижато к зоне Ахтырского разлома. Доюрский фундамент в прогибе опущен на глубину до 6-7 км [3, 8, 12]. В осевой части прогиба в кайнозойском чехле прослеживается Анастасиевско-Краснодарская эшелонированная цепочка небольших, изолированных антиклинальных складок, которая выделена как флексурно-разрывная зона над разломной зоной в фундаменте (см. рис. 1, рис. 2). Выразительность складок в рельефе увеличивается в западном направлении, где появляются выраженные холмистыми грядами диапировые антиклинали. Развитие передового прогиба началось на раннеорогенном этапе (палеоген) в краевой части плиты и сопровождалось погружением с постепенным втягиванием в прогиб новых, прилегающих с севера участков платформенного крыла более обширной Азово-Кубанской впадины [14]. В позднечетвертичное время прогиб испытывает постепенное смещение в сторону Азовского моря.

Вдоль южного борта Скифской плиты, в пределах платформенного крыла Азово-Кубанской впадины, по геофизическим и геоморфологическим данным прослеживаются Новотитаровская и Ейско-Березанская флексурно—разрывные зоны. Новотитаровская зона в фундаменте образует взбросовый уступ с опущенным на 2 км южным крылом [26]. Миоценовые отложения флексурообразно изогнуты, вследствие чего, на фоне спокойной моноклинали южного падения, выделяется структурный уступ с относительно повышенными на фоне общего пологого залегания углами падения слоев к югу, где по данным сейсморазведки выделена серия бескорневых дизъюнктивных нарушений, секущих неоген—четвертичные отложения [12].

Новотитаровская и Ейско-Березанская зоны представляют собой морфоструктуры типа конского хвоста, расположенные на северном продолжении Пшехско-Адлерской зоны резкого погружения фундамента Большого Кавказа, сопровождаемой серией коротких взбросо-сдвигов. В пределах Пшехско-Адлерской зоны, в долине р. Курджипс было выявлено плиоцен-четвертичное вертикальное смещение более чем на 200 м, сопровождаемое выразительной перестройкой гидросети смешениями и перехватами речных лолин - свидетельствующими о правосдвиговой компоненте деформаций [28]. Немногочисленные данные о механизмах очагов слабых землетрясений 15.11.2004 г., 30.10.2016 и 20.02.2018 г., произошедших в Пшехско-Адлерской зоне, подтверждают преобладающий взбросо-правосдвиговый тип смещений в этой зоне [4].

На северо-западе сейсмоактивная зона Северного Кавказа ограничена Северо-Азовской флексурно-разрывной зоной, где изучены палео- и археосейсмологические проявления голоценовой сейсмотектонической активности и макросейсмические данные о слабых исторических землетрясениях [20]. В последние годы здесь произошли Бердянское (2006 г., $M_w = 3.3$) и Мариупольское (2016 г., $M_w = 4.6$) землетрясения. Для Мариупольского землетрясения имеется решение механизма очага — преобладающий правый сдвиг вдоль плоскости субширотного простирания [4].

Проявления неотектонической и современной слабой сейсмической активности трассируются вдоль системы Манычских прогибов к востоку [13]. Наиболее заметным стало Сальское землетрясение 2001 г. с M = 4.6, которое произошло под действием преобладающих напряжений сжатия, ориентированных в близ-меридиональном направлении [4].

ОЦЕНКА СКОРОСТЕЙ ОСНОВНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР РЕГИОНА

Расположение ГНСС станций

Для исследования современной геодинамики мы использовали данные 15 базовых и 18 определяемых ГНСС станций. Все определяемые ГНСС станции и часть базовых (6 станций) расположены в регионе исследования — Западном и Цен-



Рис. 2. Положение ГНСС станций на генерализованной карте активных геологических структур Западного Кавказа. Цифровая модель рельефа, по [36].

Обозначены (А–А, Б–Б) геодезические профили скоростей (направляющие штриховые жирные и тонкие красным показывают площадной охват).

Показано: ГНСС станции (больше точки черным); векторы скоростей горизонтальных смещений (стрелки белым) относительно неподвижной Евразии; положение Туапсе–Апшеронского сейсмического профиля глубинного геофизического разреза (линия бирюзовым), построенного с использованием метода микросейсмического зондирования (MM3).

Обозначены (на кириллице):

разломы: ГК – Главный Кавказский; С – Семигорский; М – Монастырский, Кр – Краснополянский; *системы* разломов: Пш – Пшехско-Адлерская, Ту – Туапсинская, Чн – Черноморская; *флексурно-разрывные зоны*: Ах – Ахтырская; А-К – Анастасиевско-Краснодарская; Но – Новотитаровская; Бе – Березанская; Ей – Ейская; Ма – Манычская; С-А – Северо-Азовская.

тральном секторах Северного Кавказа и Предкавказье (табл. 1, табл. 2, см. рис. 2):

– Станции 23GE, AROP, 23TU и 23S2 расположены на Южном склоне;

 Станции 23KR, KDAR расположены в зоне глубокого Западно-Кубанского передового прогиба;

 Станция 23ТЕ расположена в Керченско-Таманской складчатой зоне, объединяющей Крым и Большой Кавказ в единую область интенсивных современных тектонических движений;

 Станции 23ТІ и SLSK расположены на Скифской плите;

 Станции МКОР, 23МО, ZECK, CHER, STVR и КОСН расположены на Северном крыле Центрального сектора Большого Кавказа;

– Станции RSTD, 61RO, AZOV, PKRV, MARP, 61KS, KLOM, SMKR, VLGD расположены на

N⁰	Территория расположения станций	Код станции	Название станции	Организационная принадлежность станции
1		ZECK	"Зеленчукская"	IGS ¹ /EUREF ²
2		KISL	"Кисловодск"	ГАИШ МГУ ³
3	Северный Кавказ, Карацаево-Черкессия	CHER	"Черкесск"	"Гексагон Геосистемс Рус" ⁴
4		TRSK	"Терскол"	ГАИШ МГУ ³
5		NALN	"Нальчик"	"Гексагон Геосистемс Рус" ⁴
6	Предкавказье,	КОСН	"Кочубеевское"	"Гексагон Геосистемс Рус" ⁴
7	Ставропольский край	STVR	Ставрополь	"Гексагон Геосистемс Рус" ⁴
8	D	RSTD	"Ростов на Дону-1"	"Южгеосеть"5
9	Ростовская область	61RO	"Ростов на Дону–2"	"Геостройизыскания" ⁶
10		PRTN	"Притеречный"	ФИЦ ЕГС РАН ⁷
11		ARDN	"Ардон"	ФИЦ ЕГС РАН ⁷
12	Северный Кавказ, Северная Осетия	VLKZ	"Владикавказ-1"	ФИЦ ЕГС РАН ⁷
13		LATZ	"Лац"	ФИЦ ЕГС РАН ⁷
14		VLKK	"Владикавказ—2"	ГАИШ МГУ ³ , ВНЦ РАН ⁸
15	Приазовье Донецкой области Украины	MARP	"Мариуполь"	EUREF ²

Таблица 1. Региональные базовые ГНСС станции, установленные в регионе Западного Кавказа и Предкавказье

Примечание. ¹ – International GNSS Service (IGS Central Bureau, NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, United States of America); ² – EUREF Permanent GNSS Network (Royal Observatory of Belgium, av. Circulaire 3, B-1180 Brussels); ³ – ГАИШ МГУ (г. Москва, Россия); ⁴ – "Гексагон Геосистеме Рус" (г. Москва, Россия); ⁵ – "Юж-ГеоСеть" (г. Ростов-на-Дону, Россия); ⁶ – "Геостройизыскания" (г. Москва, Россия); ⁷ – ФИЦ ЕГС РАН (г. Обнинск, Калужская обл., Россия); ⁸ – ВНЦ РАН (г. Владикавказ, Республика Северная Осетия–Алания, Россия).

Скифской плите и Восточно-Европейской платформе.

Обработка данных наблюдений

Развитие методов спутниковой геодезии позволило достичь высокой точности определения координат фазового центра принимающей антенны. В глобальной навигационной спутниковой системе (ГНСС) NAVSTAR-GPS при обработке фазовых задержек сигнала координатные определения за сутки достигают миллиметровой точности, а в случае непрерывных наблюдений за год и более — субмиллиметровой. Высокая точность позволяет применять ГНСС NAVSTAR-GPS для реконструкции современных относительных смещений и скорости горизонтальных движений земной коры.

В качестве базовых/опорных используются 60 ГНСС станций. Из них 45 станций входят в Международную службу ГНСС (IGS) и включены в Международную земную систему отсчета (ITRF), в том числе Северокавказская станция ZECK. Базовые станции покрывают полусферу земной поверхности, в центре которой расположен исследуемый регион. Помимо станций IGS в работе также используются 15 региональных базовых станций.

В основу исследования кинематики региона положен анализ временны́х рядов положений ГНСС станций. Исходные данные непрерывных наблюдений представляют собой наборы фазовых и кодовых измерений на двух частотах с интервалом регистрации 30 сек. Обработка состоит в оценке координат определяемых ГНСС станций путем уравнивания региональной сети с глобальной сетью.

Обработка осуществлялась пакетом программ GAMIT/GLOBK [45], предназначенным для высокоточных геодезических определений по радионавигационным спутниковым измерениям на комплексе хранения и обработки астрономических данных ГАИШ МГУ (г. Москва, Россия) [44].

Nº	Территория расположения станций	Код станции	Название станции	Организационная принадлежность станции
1		23GE	"Геленджик"	"Геостройизыскания" ¹
2		AROP	"Архипо-Осиповка"	"Южгеосеть"2
3		23TU	"Туапсе"	"Геостройизыскания" ¹
4		2382	"Сочи"	"Геостройизыскания" ¹
5	Краснодарский край	23TE	"Темрюк"	"Геостройизыскания" ¹
6		23KR	"Краснодар-1"	"Геостройизыскания" ¹
7		KDAR	"Краснодар-2"	"Южгеосеть" ²
8		23MO	"Мостовской"	"Геостройизыскания" ¹
9		23TI	"Тихорецк"	"Геостройизыскания" ¹
10	Республика Адыгея	МКОР	"Майкоп"	"Южгеосеть" ²
11		SLSK	"Сальск"	"Южгеосеть"2
12		AZOV	"Азов"	"Южгеосеть" ²
13		FRMT	"Ростов на Дону-3"	"Южгеосеть"2
14	Ростовская область	PKRV	"Покровское"	"Южгеосеть" ²
15		SMKR	"Семикаракорск"	"Южгеосеть" ²
16		KLOM	"Шахты"	"Южгеосеть"2
17		61KS	"Красный Сулин"	"Геостройизыскания" ¹
18		VLGD	"Вологодонск"	"Южгеосеть" ²

Таблица 2. Определяемые региональные ГНСС станции

Примечание.¹ – ООО "Геостройизыскания" (г. Москва, Россия); ² – ООО "Южгеосеть" (г. Ростов-на-Дону, Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Решения выполнены в глобальной Международной земной отсчетной основе ITRF2014 и региональной системе относительно неподвижной Евразии ITRF2014_EURA [35]. В результате обработки получены временные ряды координат и скорости смещений станций в ITRF2014 и ITRF2014_EURA (табл. 3, табл. 4, см. рис. 2).

При изучения региональной геодинамики существует общепринятый метод сопоставления ГНСС измерений с глубинными геофизическими, структурно-геологическими и морфотектоническими разрезами [17, 25, 38–40, 43, 44]. Из совокупности региональных ГНСС станций нами были выделены группы станций, расположенных в изучаемых геолого-тектонических структурах, по данным которых были построены два профиля скоростей (см. рис. 2, профили А–А', Б–Б'). Горизонтальные скорости смещений геодезических станций в локальной системе отсчета ITRF2014_EURA, были проецированы на заданное направление θ при повороте системы координат по часовой стрелке. Представлены направление и протяженность профилей (см. рис. 2):

Профиль А–А' включает 6 станций и ориентирован по азимуту 41.33°, длина профиля 441 км, ширина 51 км;

 Профиль Б–Б' ориентирован по азимуту 35.05° и состоит из 8 станций, длина профиля 183 км, ширина 120 км.

Представлены результаты профилирования (табл. 5, табл. 6, см. рис. 3, см. рис. 4). Положительные значения скоростей вдоль профилей соответствует северо-восточному направлению, отрицательные значения — юго-западному направлению. Вкрест профилей положительные значения скоростей соответствуют юго-восточному направлению, отрицательные значения скоростей соответствуют северо-западному направлению.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценки скоростей смещений ГНСС станций в глобальной Международной земной отсчетной основе ITRF2014 показывают согласованное движение структур Большого Кавказа в север—севе-

Код станции	Название станции	Высота, м	V(север), мм/год	V (восток), мм/год	V, мм/год	Азимут, °
61KS	"Красный Сулин"	140.037	25.49 ± 0.95	11.02 ± 0.95	27.77 ± 0.95	66.62
KLOM	"Шахты"	67.903	25.20 ± 1.13	11.79 ± 1.14	27.82 ± 1.14	64.93
SMKR	"Семикаракорск"	27.092	24.45 ± 0.95	11.01 ± 0.95	26.81 ± 0.95	65.76
VLGD	"Вологодонск"	54.529	24.04 ± 0.98	10.88 ± 0.98	26.39 ± 0.98	65.65
RSTD	"Ростов-на-Дону-1"	92.969	24.47 ± 0.80	11.52 ± 0.81	27.05 ± 0.81	64.79
61RO	"Ростов-на-Дону-2"	126.193	24.98 ± 0.79	11.03 ± 0.79	27.31 ± 0.79	66.18
FRMT	"Ростов-на-Дону-3"	109.352	26.24 ± 1.21	11.37 ± 1.21	28.60 ± 1.21	66.57
AZOV	"Азов"	50.059	23.81 ± 1.11	11.27 ± 1.12	26.34 ± 1.12	64.67
PKRV	"Покровское"	33.870	24.32 ± 0.92	11.06 ± 0.92	26.72 ± 0.92	65.55
MARP	"Мариуполь"	96.165	22.71 ± 0.79	9.68 ± 0.79	24.69 ± 0.79	66.91
SLSK	"Сальск"	49.549	24.96 ± 1.35	11.11 ± 1.35	27.32 ± 1.35	66.01
23TI	"Тихорецк"	97.756	26.21 ± 0.92	8.91 ± 0.93	27.68 ± 0.93	71.22
23TE	"Темрюк"	26.835	26.26 ± 1.09	11.04 ± 1.09	28.49 ± 1.09	67.20
23GE	"Геленджик"	193.775	23.95 ± 1.14	10.07 ± 1.15	25.98 ± 1.15	67.20
AROP	"Архипо-Осиповка"	42.431	24.48 ± 1.93	10.40 ± 1.94	26.60 ± 1.94	66.98
23TU	"Туапсе"	89.003	26.88 ± 0.89	11.29 ± 0.89	29.15 ± 0.89	67.22
2382	"Сочи"	72.316	24.48 ± 0.98	12.00 ± 0.98	27.26 ± 0.98	63.89
23KR	"Краснодар-1"	67.431	25.40 ± 0.97	11.67 ± 0.97	27.95 ± 0.97	65.32
KDAR	"Краснодар-2"	52.563	24.62 ± 0.98	10.57 ± 0.98	26.79 ± 0.98	66.76
МКОР	"Майкоп"	243.403	25.56 ± 1.22	10.05 ± 1.23	27.46 ± 1.23	68.54
23MO	"Мостовской"	418.310	25.07 ± 1.08	10.55 ± 1.08	27.20 ± 1.08	67.18
ZECK	"Зеленчукская"	1166.299	25.47 ± 0.43	11.36 ± 0.43	27.89 ± 0.43	65.96
CHER	"Черкесск"	571.705	24.45 ± 0.88	10.42 ± 0.89	26.58 ± 0.89	66.92
KOCH	"Кочубеевское"	342.453	24.96 ± 0.89	11.02 ± 0.89	27.28 ± 0.89	66.18
STVR	"Ставрополь"	562.337	24.68 ± 0.88	10.42 ± 0.88	26.79 ± 0.88	67.11

Таблица 3. ГНСС станции и скорости их горизонтальных смещений в ITRF2014

Примечание. Высота – высотная координата местоположения станций в WGS84; *V*(север), *V*(восток) – северная, восточная компоненты скорости горизонтальных смещений; *V* – суммарная горизонтальная скорость и азимут.

ро-восточном направлении со скоростью 27– 28 мм/год, что подтверждает результаты ранее проведенных исследований [15, 17, 41] (см. табл. 3). На основе этих оценок получены скорости смещений станций относительно неподвижной Евразии (см. рис. 2, см. табл. 4). Количество ГНСС станций на Западном Кавказе позволяет выявить характерные современные горизонтальные движения только на уровне крупнейших тектонических структур.

В региональной системе отсчета относительно неподвижной Евразии выделяется ряд характерных геодинамических особенностей. В северной части рассматриваемого региона для станций SLSK, RSTD, 61RO, AZOV, PKRV, MARP можно предположить веерообразный рисунок векторов горизонтальных скоростей, ограниченный Северо-Азовской флексурно-разрывной зоной (см. рис. 2). Такой кинематический рисунок может отражать вращение северного крыла этой структуры против часовой стрелки и, соответственно, — современные сдвиговые смещения. Однако вдоль Манычской флексурно-разрывной зоны отчетливых признаков смещений не наблюдается.

Геодезические профили

Профиль А–А'. Данный профиль охватывает протяженную территорию в юго-западном–северо-восточном направлении и пересекает вкрест (перпендикулярно) основные геологические структуры региона (см. рис. 3, см. табл. 5):

– горное сооружение Западного Кавказа (Южный склон, Осевую зону, Северный склон);

- Западно-Кубанский передовой прогиб;

- Скифскую плиту.

59

МИЛЮКОВ и др.

Код станции	Название станции ГНСС	V (север), мм/год	V (восток), мм/год	V, мм/год	Азимут, °
61KS	"Красный Сулин"	0.09 ± 0.95	0.09 ± 0.95	0.13 ± 0.95	45.00
KLOM	"Шахты"	-0.25 ± 1.13	0.89 ± 1.14	0.92 ± 1.14	-15.69
SMKR	"Семикаракорск"	-1.11 ± 0.95	0.25 ± 0.95	1.14 ± 0.95	-77.31
VLGD	"Вологодонск"	-1.72 ± 0.98	0.43 ± 0.98	1.77 ± 0.98	-75.96
RSTD	"Ростов-на-Дону-1"	-0.97 ± 0.80	0.53 ± 0.81	1.11 ± 0.81	-61.35
61RO	"Ростов-на-Дону-2"	-0.46 ± 0.79	0.06 ± 0.79	0.46 ± 0.79	-82.57
FRMT	"Ростов на Дону-3"	0.80 ± 1.20	0.35 ± 1.21	0.87 ± 1.21	66.37
AZOV	"Азов"	-1.62 ± 1.11	0.21 ± 1.12	1.63 ± 1.12	-82.61
PKRV	"Покровское"	-0.98 ± 0.92	-0.11 ± 0.92	0.99 ± 0.92	-96.40
MARP	"Мариуполь"	-2.43 ± 0.79	-1.81 ± 0.79	3.03 ± 0.79	-126.68
SLSK	"Сальск"	-0.87 ± 1.35	0.52 ± 1.35	1.01 ± 1.35	-59.13
23TI	"Тихорецк"	0.49 ± 0.92	-1.99 ± 0.93	2.05 ± 0.93	166.17
23TE	"Темрюк"	0.84 ± 1.09	-0.44 ± 1.09	0.95 ± 1.09	117.65
23GE	"Геленджик"	-1.67 ± 1.14	-1.25 ± 1.15	2.09 ± 1.15	-126.81
AROP	"Архипо-Осиповка"	-1.19 ± 1.93	-0.89 ± 1.94	1.49 ± 1.94	-126.79
23TU	"Туапсе"	1.07 ± 0.89	0.17 ± 0.89	1.08 ± 0.89	80.97
2382	"Сочи"	-1.50 ± 0.98	1.02 ± 0.98	1.81 ± 0.98	-55.78
23KR	"Краснодар-1"	-0.26 ± 0.97	0.52 ± 0.97	0.58 ± 0.97	-26.57
KDAR	"Краснодар-2"	-1.06 ± 0.98	-0.55 ± 0.98	1.19 ± 0.98	-117.42
МКОР	"Майкоп"	-0.33 ± 1.22	-0.85 ± 1.23	0.91 ± 1.23	-158.78
23MO	"Мостовской"	-0.95 ± 1.08	-0.20 ± 1.08	0.97 ± 1.08	-101.89
ZECK	"Зеленчукская"	-0.66 ± 0.43	0.69 ± 0.43	0.95 ± 0.43	-43.73
CHER	"Черкесск"	-1.76 ± 0.88	-0.04 ± 0.89	1.76 ± 0.89	-91.30
КОСН	"Кочубеевское"	-1.16 ± 0.89	0.51 ± 0.89	1.27 ± 0.89	-66.27
STVR	"Ставрополь"	-1.42 ± 0.88	-0.06 ± 0.88	1.42 ± 0.88	-92.42

Таблица 4. Скорости горизонтальных смещений ГНСС станций, относительно неподвижной Евразии (ITRF2014_EURA)

Примечание. *V*(север) – северная и *V*(восток) – восточная компоненты скорости горизонтальных смещений; *V* – суммарная горизонтальная скорость и азимут; погрешность оценок компонент скорости уменьшается пропорционально длительности ряда наблюдений, начиная с 3-х лет непрерывных наблюдений, величина и направление вектора скорости практически не меняются, хотя погрешность формально может еще оставаться достаточно большой.

Для составления схематичного геологического разреза по профилю A–A' в качестве исходных данных использованы:

 сбалансированный геологический разрез, ортогонально пересекающий структуры всего рассматриваемого района [19];

- глубинные сейсмические разрезы [6, 7, 12, 22];

 – глубинные геофизические разрезы, построенные с использованием методов обменных волн землетрясений (MOB3) и магнитотеллурического зондирования (MT3) [2, 7, 32];

– данные глубокого бурения [8, 9].

Профиль А–А' отражает основные особенности геологического строения Западного Кавказа и Предкавказья).

На Южном склоне Западного Кавказа ГНСС станции 23GE и AROP показывают движение в юго-западном направлении вдоль профиля A–A' со средней скоростью 1.74 мм/год, что может сви-

детельствовать о надвигании Южного склона на Туапсинский прогиб, прилегающий со стороны Черного моря. Станции 23KR и KDAR, расположенные в Западно-Кубанском передовом прогибе, показывают среднюю скорость смещения 0.44 мм/год в юго-западном направлении вдоль профиля А–А'. Тем самым, можно предполагать, что область горного сооружения Большого Кавказа и прилегающей части Западно-Кубанского прогиба, расположенная вдоль профиля А–А', испытывает поперечное растяжение со скоростью 1.3 мм/год. Ввиду отсутствия станций на Северном крыле и преобладании активных сбросов в Осевой зоне [24], мы можем предположить, что растяжение реализуется в Осевой зоне. В центральной части Азово-Кубанской впадины Скифской плиты расположена станция 23TI, скорость ее смещения составляет 1.17 мм/год в юго-западном направлении вдоль профиля А-А'. Севернее располагается станция SLSK со скоростью смещения 0.18 мм/год также в юго-западном направлении вдоль профиля. Юг-юго-западная область Азово-Кубанской впадины, согласно скоростям движения станций 23KR, KDAR и 23TI, должна испытывать линейное сокращение со скоростью 0.7 мм/год, север-северо-восточная область, согласно скоростям движения станций 23ТІ и SLSK, – растяжение со скоростью 1 мм/год. В результате это должно приводить к разнонаправленным деформационным режимам в южной и северной частях впадины, что связано с правосдвиговыми смещениями вдоль Новотитаровской флексурно-разрывной зоны, устанавливаемым также по данным о механизмах очагов слабых землетрясений [4].

Скорости смещения станций вкрест профиля А-А' показывают юго-восточное направление с увеличением значения скорости от Черного моря к платформенной части региона. Станции 23GE и AROP на Южном склоне показывают среднюю скорость 0.4 мм/год, средняя скорость станций 23KR и KDAR Западно-Кубанского передового прогиба составляет 0.5 мм/год, что должно приводить к линейному растяжению осевой зоны и северного склона горного сооружения Западного Кавказа в области профиля А-А' со скоростью 0.1 мм/год в юго-восточном направлении. Станция 23TI на Скифской плите движется в северозападном направлении с высокой скоростью 1.68 мм/год, это по-видимому связано с правосдвиговыми смещениями вдоль Новотитаровской флексурно-разрывной зоны. На севере региона станция SLSK поперек профиля А-А' показывает скорость смещения 1 мм/год в юго-восточном направлении, что должно приводить к высокоинтенсивному растяжению Азово-Кубанской впадины в северо-западном-юго-восточном направлении. Данная геодинамическая особенность характеризует высокую интенсивность тектонических процессов Новотитаровской и, воз-

ГЕОТЕКТОНИКА № 1 2022

Таблица 5. Скорости горизонтальных смещений ГНСС станций в неподвижной Евразии (ITRF2014_EURA), спроецированные на профиль A–A' с азимутом 41.33°

Код	$V_{\rm ALONG}$, мм/год	V _{CROSS} , мм/год
23GE	-2.04 ± 1.15	0.43 ± 1.15
AROP	-1.45 ± 1.94	0.31 ± 1.94
23KR	0.22 ± 0.97	0.54 ± 0.97
KDAR	-1.11 ± 0.98	0.43 ± 0.98
23TI	-1.17 ± 0.93	-1.68 ± 0.93
SLSK	-0.18 ± 1.35	1.00 ± 1.35

Примечание. Проекция скоростей V_{ALONG} — вдоль и V_{CROSS} — поперек профиля.

Таблица 6. Скорости горизонтальных смещений ГНСС станций в неподвижной Евразии (ITRF2014_EURA), спроецированные на профиль Б–Б' с азимутом 35.05°.

Код	$V_{\rm ALONG}$, мм/год	$V_{ m CROSS}$, мм/год
23GE	-1.98 ± 1.15	0.65 ± 1.15
AROP	-1.41 ± 1.94	0.46 ± 1.94
23TU	0.75 ± 0.89	-0.78 ± 0.89
23S2	-0.03 ± 0.98	1.81 ± 0.98
23KR	0.28 ± 0.97	0.51 ± 0.97
KDAR	-1.06 ± 0.98	0.55 ± 0.98
МКОР	-0.89 ± 1.23	-0.22 ± 1.23
23MO	-0.71 ± 1.08	0.66 ± 1.08

Примечание. Проекция скоростей $V_{\rm ALONG}$ — вдоль и $V_{\rm CROSS}$ — поперек профиля.

можно, Березанской и Ейской флексурно-разрывных зон.

Профиль Б-Б'. Данный профиль менее протяженный, он охватывает все горное сооружение Западного Кавказа, Западно-Кубанский передовой прогиб и часть северной моноклинали Центрального Кавказа (см. рис. 4, табл. 6). Для составления непрерывного геологического разреза по профилю Б-Б' геологические данные были дополнены результатами глубинного геофизического разреза, построенного с использованием метода микросейсмического зондирования (ММЗ). Выделяемое на разрезе ММЗ под Осевой зоной низкоскоростное тело, в отличие от Центрального Кавказа, имеет значительно меньшую контрастность и выше глубины 18-20 км прослеживается весьма неотчетливо. Очень условно, выходы этого тела под дневную поверхность можно увязать с зонами Бекишейского и Главного Кавказского разломов. Наиболее контрастные глу-



Рис. 3. Геодезический профиль A–A' с азимутом 41°, совмещенный со схематическим геологическим разрезом. Продольные (V_{ALONG}) и поперечными (V_{CROSS}) проекции горизонтальных скоростей смещений ГНСС станции, относительно неподвижной Евразии (ITRF2014_EURA) (с использованием данных: [6–9, 12, 19, 22]). Обозначены (на кириллице):

разломы: С – Семигорский (Главный Кавказский); *система разломов*: Чн – Черноморская; *флексурно-разрывные зоны*: Ах – Ахтырская, А-К – Анастасиевско-Краснодарская, Но – Новотитаровская, Бе – Березанская, Ей – Ейская; Ма – Манычская.

1 – ГНСС станции; *2* – позднеплиоцен–эоплейстоценовый геоморфологический уровень; *3* – разломы и флексурноразрывные зоны; *4* – геологические границы

бинные низкоскоростные тела приурочены к границе Западно-Кубанского прогиба с горным сооружением (Ахтырская и Пшехско-Адлерская системы разломов).

На профиле Б–Б' станции Южного склона 23GE, AROP и Западно-Кубанского прогиба 23KR, KDAR показывают ЮЗ направление движений, соответствующее надвигу Южного склона на Туапсинский прогиб и растяжению вкрест Осевой зоны горного сооружения. Между станциями 23GE, AROP и 23TU находится Туапсинская поперечная зона разломов, при пересечении с которой происходит смена ориентировки векторов смещений указанных станций (см. рис. 2). Вдоль профиля Б–Б' станции 23GE, AROP показывают среднюю скорость 1.69 мм/год в юго-западном направлении, станция 23TU показывает скорость 0.75 мм/год в северо-восточном направлении (см. рис. 4).

В результате разнонаправленных движений станций 23GE, AROP с одной стороны и 23TU с другой, вдоль профиля Б—Б' должно происходить растяжение со скоростью 2.4 мм/год, которое может реализовываться в левосдвиговых смещениях по Туапсинской системе разломов (см. рис. 4). Аналогичная кинематика молодых смещений



Рис. 4. Геодезический профиль Б–Б' с азимутом 35°, совмещенный со схематическим геологическим разрезом. Продольные (V_{ALONG}) и поперечными (V_{CROSS}) проекции горизонтальных скоростей смещений ГНСС станции, относительно неподвижной Евразии (ITRF2014_EURA).

Разрез ММЗ (цветной) по профилю Туапсе-Апшеронск.

Обозначены (на кириллице):

разломы: Ю-М – Южно-Михайловский, Бк – Бекишейский, Г – Главный Кавказский, Ш – Шаумяновский, Т – Тугупсинский, Ах – Ахтырский, Пш – Пшехско-Адлерский; система разломов: М-Ш – Мессажайско–Шепсинская; флексурно-разрывные зоны: Но – Новотитаровская, Бе – Березанская.

1 – ГНСС станции; 2 – позднеплиоцен – эоплейстоценовый геоморфологический уровень; 3 – основные разломы и их предполагаемое положение на профиле MM3

установлена по геологическим данным [24]. В восточной части профиля расположены станции 23S2, МКОР и 23МО. Скорость смещения станции 23S2 вдоль профиля Б-Б' близка к 0 мм/год. Станции МКОР и 23МО, расположенные в моноклинальной зоне Северного крыла Большого Кавказа, вдоль профиля Б-Б' показывают среднюю скорость 0.8 мм/год в ЮЗ направлении. Соответственно, со скоростью 0.8 мм/год происходит линейное сжатие вдоль профиля Б-Б' между станциями МКОР, 23МО и 23S2. Таким образом, скорости вдоль профиля Б-Б' (поперек горного сооружения) показывают, что к западу от Туапсинской зоны разломов Осевая зона Западного Кавказа находится в условиях растяжения, в то время как восточнее наблюдается интенсивное сжатие.

Скорости смещения станций поперек профиля Б–Б', как и на Профиле А–А', имеют юго-восточное направление, за исключением станций 23TU и МКОР. На Южном склоне, поперек профиля Б–Б', станции 23GE, AROP показывают среднюю скорость смещения 0.55 мм/год в юговосточном направлении. Смещение станции 23TU происходит со скоростью 0.78 мм/год в северо-западном направлении. Скорость станции 23S2 составляет 1.81 мм/год в юго-восточном направлении. Таким образом, между станциями 23GE, AROP и 23TU отмечается линейное сжатие со скоростью 1.33 мм/год.

Отмеченное сжатие можно интерпретировать как результат правосдвиговых смещений вдоль разломов Осевой зоны северо-западной ориентировки и сжатия по сегментам субширотного простирания. Между станциями 23TU и 23S2 происходит интенсивное растяжение со скоростью 2.6 мм/год. Данные геодинамические особенности характеризуют активность Туапсинской системы разломов. Смещение станции 23S2 можно связать с правосдвиговыми движениями и сжатием вдоль зоны Монастырского разлома, отделяющего приподнятую ступень Туапсинского прогиба (Сочи-Адлерскую депрессию) от структур Южного склона Большого Кавказа. Высокая интенсивность и аналогичная кинематика смещений в зоне Монастырского разлома установлены и по геологическим данным [21].

Предкавказье характеризуется следующими скоростями поперек профиля Б–Б'. Средняя скорость смещения станций 23КR и KDAR составляет 0.53 мм/год в юго-восточном направлении. Станция МКОР смещается со скорость 0.22 мм/год в северо-западном направлении, а станция 23МО со скоростью 0.66 мм/год смещается в юго-восточном направлении.

Таким образом, между станциями 23KR, KDAR и станцией МКОР происходит линейное сжатие со скоростью 0.75 мм/год, которое можно интер-

претировать, как результат правосторонних и взбросо-сдвиговых смещений по Пшехско-Адлерской системе разломов. Между станциями МКОР и 23МО происходит растяжение со скоростью 0.88 мм/год.

Скорости смещений станций поперек профиля Б–Б' показывают, что горное сооружение Западного Кавказа находится в условиях продольного сжатия. Восточнее Туапсинской зоны разломов горное сооружение испытывает продольное растяжение, при этом интенсивность деформационных процессов на Южном склоне выше, чем в Предкавказье.

выводы

Анализ ГНСС измерений в период 2016—21 гг. с использованием данных о глубинном строении и активной тектонике Западного Кавказа и Предкавказья позволил составить общие представления о современной динамике крупнейших морфоструктур.

1. Результаты ГНСС измерений согласуются с геолого-геоморфологическими данными о кинематике смещений по разломам. Эти данные свидетельствуют о продольном сжатии вдоль окраин горного сооружения Западного Кавказа и растяжении в его осевой части с не менее интенсивными горизонтальными смещениями по поперечным (Туапсинская и Пшехско-Адлерская) и продольным (Монастырский, сегменты Главного Кавказского и др.) системам активных разломов.

2. Скорости, измеренные в пределах Скифской плиты, по величинам близки скоростям в горном сооружении Западного Кавказа. Скифская плита на фоне Восточно-Европейской платформы также отличается относительно повышенной современной сейсмической активностью. Зафиксированы аномальные современные смещения в Северо-Азовской зоне, где происходят слабые землетрясения.

3. Проведенный анализ подтвердил, что Предкавказье не менее активно, чем Кавказ. Выполненные исследования имеют фундаментальный характер и направлены на познание современных тектонических процессов, в то же время, они имеют прикладное значение, т.к. современные тектонические движения опасны для разнообразных строительных и инженерных сооружений.

Благодарности. Во время создания статьи ушел из жизни проф. Е.А. Рогожин (г. Москва, ИФЗ РАН, Россия), который оказал нам неоценимую помощь в подготовке материалов и консультациях, — мы навсегда сохраним светлую память о нем.

Авторы выражают искреннюю благодарность ООО "Гексагон Геосистемс Рус" (г. Москва, Россия), ООО "Геостройизыскания" (г. Москва, Россия) и ООО "Южгеосеть" (г. Ростов-на-Дону, Россия) за предоставленные ГНСС данные. Авторы благодарят анонимного рецензента и рецензента проф. В.Г. Трифонова (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за комментарии, которые позволили улучшить статью, авторы признательны М.Н. Шуплецовой (ГИН РАН, г.Москва, Россия) за тщательное редактирование и подготовку статьи.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках Междисциплинарной научно-образовательной школы "Фундаментальные и прикладные исследования космоса" Московского государственного университете им. М.В. Ломоносова и при финансовой поддержке международного гранта РФФИ № 21-55-46007 СТ_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьин И.В. Сейсмичность Северного Кавказа. М.: Наука, 1977. 149 с.
- Белуженко Е.В. Верхнемиоцен-эоплейстоценовые грубообломочные отложения Западного и Центрального Предкавказья // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2011. № 5. С. 78–95.
- Белявский В.В., Егоркин А.В., Солодилов Л.Н., Ракитов В.А., Яковлев А.Г. Некоторые результаты применения методов естественных электромагнитных и сейсмических полей на Северном Кавказе // Физика Земли. 2007. № 4. С. 4–14.
- Габсатарова И.П. Платформенная сейсмичность Северного Кавказа. – В сб.: Структура, вещественный состав, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов. / Под ред. Л.И. Надежка, Т.Б. Силкиной. Мат-лы XXII междунар. конф., г. Воронеж, 22–25 сентября. 2020 г. Воронеж: ВГУ, 2020. С. 96–101.
- Глумов И.Ф., Гулев В.Л., Сенин Б.В., Карнаухов С.М. Региональная геология и перспективы нефтегазоносности Черноморской глубоководной впадины и прилегающих шельфовых зон. / Под ред. Б.В. Сенина. М.: Недра, 2014. Ч. 1. 279 с.
- 6. Горбатиков А.В., Габсатарова И.П., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Сысолин А.И., Погребченко В.А. Уточнение глубинного строения и кинематики тектонических движений в области Сальского землетрясения 2001 г. на основе новых геофизических данных // Вопросы инженерной сейсмологии. 2019. Т. 46. № 2. С. 5–15. https://doi.org/10.21455/VIS2019.2-1
- Золотов Е.Е., Кадурин И.Н., Кадурина Л.С., Недядько В.В., Ракитов В.А., Рогожин Е.А., Ляшенко Л.Л. Новые данные о глубинном строении земной коры и сейсмичности Западного Кавказа. – В кн.: Геофизика XXI столетия: 2001 год / Под ред. Л.Н. Солодилова. М.: Научный мир, 2001. С. 85–89.
- Истратов И.В. Горная геометрия и газонефтяная геология Северного Кавказа. М.: Грааль, 2003. 378 с.

 Колтыгина В.И., Куваева М.Е., Ермаков В.А., Губкина А.Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1000000. – L-(37), (38) (Ростов-на-Дону). СПб.: ВСЕГЕИ, 2000.

65

- Копп М.Л. Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизионном поясе. / Под ред. Ю.Г. Леонова. М.: Научный мир, 1997. 313 с.
- Корженков А.М., Новичихин А.М., Овсюченко А.Н., Рангелов Б.К., Рогожин Е.А., Димитров О.В., Ларьков А.С., Лю Ц. Поиск следов сильных древних землетрясений на Западном Кавказе: архео-сейсмологические исследования в древней Горгиппии // Геофиз. процессы и биосфера. 2019. Т. 18. № 4. С. 110–128. https://doi.org/10.21455/GPB2019.4-10

12. Крипиневич В.Л., Михайленко Р.С., Корнеев В.И., Кондратьев И.А. Новые данные о геологической

- Кондратьев И.А. Новые данные о геологическом строении и перспективах нефтегазоносности Западного Предкавказья // Геология нефти и газа. 1989. № 8. С. 2–8.
- Макаров В.И. Макарова Н.В., Несмеянов С.А., Макеев В.М., Дорожко А.Л., Зайцев А.В., Зеленщиков Г.В., Серебрякова Л.И., Суханова Т.В. Новейшая тектоника и геодинамика: Область сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты / Под ред. Ю.К. Щукина. М.: Наука, 2006. 206 с.
- 14. *Милановский Е.Е.* Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.
- Милюков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям // Геотектоника. 2015. №3. С. 56–65. https://doi.org/10.7868/S0016853X15030042
- 16. Милюков В.К., Миронов А.П., Стеблов Г.М., Шевченко В.И., Кусраев А.Г., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М. Современные горизонтальные движения основных элементов тектонической структуры Осетинской части Большого Кавказа по GPS-измерениям // Физика Земли. 2015. № 4. С. 68–80. https://doi.org/10.7868/S0002333715040079
- 17. Милюков В.К., Миронов А.П., Овсюченко А.Н., Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М., Николаев А.В. Скорости современных горизонтальных движений в центральном секторе Большого Кавказа по данным GPS-наблюдений и их связь с тектоникой и глубинным строением земной коры // ДАН. 2018. Т. 481. № 3. С. 291–295. https://doi.org/10.31857/S086956520001381-2
- 18. *Несмеянов С.А.* Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа. М.: Недра, 1992. 254 с.
- Никишин А.М., Ершов А.В., Никишин В.А. Геологическая история Западного Кавказа и сопряженных краевых прогибов на основе анализа регионального сбалансированного разреза // ДАН. 2010. Т. 430. № 4. С. 515–517.
- Никонов А.А., Габсатарова И.П. Северо-Азовский сейсмолинеамент – активная и опасная структура. – В кн.: Геологическая среда, минерагенические

и сейсмотектонические процессы. / Под ред. Н.М. Чернышова, Л.И. Надежка – Мат-лы XVIII Междунар. конфер. г. Воронеж, 24–29 сентября 2012 г. Воронеж: Научная книга, 2012. С. 224–229.

- Овсюченко А.Н., Хилько А.В., Шварев С.В., Костенко К.А., Мараханов А.В., Рогожин Е.А., Новиков С.С., Ларьков А.С. Комплексные геолого-геофизические исследования активных разломов в Сочи-Краснополянском районе // Физика Земли. 2013. № 6. С. 116–138. https://doi.org/10.7868/S0002333713060112
- Попков В.И. Чешуйчато-надвиговое строение Северо-Западного Кавказа // ДАН. 2006. Т. 411. № 2. С. 835–841.
- Расцветаев Л.М., Маринин А.В., Тверитинова Т.Ю. Позднеальпийские дизъюнктивные системы и геодинамика Западного Кавказа // Физика Земли. 2010. № 5. С. 31–40.
- Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатиков А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.
- 25. Рогожин Е.А., Милюков В.К., Миронов А.П., Овсюченко А.Н., Горбатиков А.В., Андреева Н.В., Лукашова Р.Н., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М. Характеристики современных горизонтальных движений в зонах заметных землетрясений начала ХХІ в. в центральном секторе Большого Кавказа по данным GPS-наблюдений и их связь с новейшей тектоникой и глубинным строением земной коры // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18. № 1. С. 91–102.

https://doi.org/10.21455/GPB2019.1-8

- 26. Тектоника южного обрамления Восточно–Европейской платформы. – Объяснительная записка к тектонической карте Черноморско–Каспийского региона. М-б 1 : 2500000 / Под ред. В.Е. Хаина, В.И. Попкова. Краснодар: КубГУ, 2009. 213 с.
- 27. Трихунков Я.И. Неотектонические преобразования кайнозойских складчатых структур Северо-Западного Кавказа // Геотектоника. 2016. № 5. С. 67–81. https://doi.org/10.7868/S0016853X16040081
- 28. *Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* О молодых подвижках по древним разломам на Западном Кавказе и их влиянии на гидрографическую сеть // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1959. № 8. С. 17–21.
- Шарданов А.Н. Тектоническая карта Краснодарского края. – В кн.: Вопросы тектоники нефтегазоносных областей. / Под ред. М.И. Варенцова. М.: АН СССР, 1962. С. 149–157.
- Шевченко В.И., Лукк А.А., Гусева Т.В. Автономная и плейттектоническая геодинамики некоторых подвижных поясов и сооружений. М.: ИФЗ РАН, 2017. 612 с.
- Шемпелев А.Г. Западный Кавказ по геофизическим данным // Отечественная геология. 2004. № 2. С. 69–76.

- Шолпо В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А. Складчатость Большого Кавказа. / Под ред. Е.Е. Милановского. М.: Наука, 1993. 192 с.
- 33. Юнга С.Л. Сейсмотектонические деформации и напряжения в складчатых поясах неотектонической активизации Северной Евразии // Физика Земли. 1996. № 12. С. 37–58.
- Altamimi Z., Metivier L., Collilieux X. ITRF2008 plate motion model // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117. B07402.

https://doi.org/10.1029/2011JB008930

- 35. *Finetti I., Bricchi G., Del Ben A., Pipan M., Xuan Z.* Geophysical study of the Black Sea. // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 1988. Vol. 30. № 117– 118. P. 197–324.
- GEBCO Compilation Group, 2021. GEBCO 2021 Grid. https://www.gebco.net (https://doi.org/10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f)
- Ismail-Zadeh A., Chabukiani A., Floyd M., Gorshkov A., Gvishiani A., Ismail-Zadeh T., Kaban M., Kadirov F., Karapetyan J., Kangarli T., Kiria J., Koulakov I., Mosar J., Mumladze T., Muller B., Sadradze N., Safarov R., Schilling F., Soloviev A. Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus // Earth-Sci. Rev. 2020. Vol. 207. P. 103222. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103222
- Kadirov F.A., Mammadov S.A., Reilinger R., McClusky S. Some new data on modern tectonic deformation and active faulting in Azerbaijan (according to global positioning system measurements) // Proc. Azerbaijan Nation. Acad. Sci.: Sci. Earth. 2008. No. 1. P. 82–88.
- 39. 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., Sanl I., Seeger H., Tealeb A., Toksoz 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. P. 5695– 5719.

https://doi.org/10.1029/1999JB900351

- 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/GLONASS network // J. Geodynam. 2010. Vol. 49. P.216–223. https://doi.org/10.1016/j.jog.2009.10.003
- Milyukov V., Rogozhin E., Gorbatikov A., Mironov A., Myasnikov A., Stepanova M. Contemporary State of the Elbrus Volcanic Center (The Northern Caucasus) // Pure Appl. Geophys. 2018. Vol. 175. No. 5. P. 1889– 1907.

https://doi.org/10.1007/s00024-017-1595-x

42. 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 // Geoph. Res. Lett. 1997. Vol. 24. No. 14. P. 1815-1818. https://doi.org/10.1029/97GL01672

43. Sokhadze G., Flovd M., Godoladze T., King R., Cowgill E.S., Javakhishvili Z., Hahubia G., Reilinger R. Active convergence between the Lesser and Greater Caucasus in Georgia: Constraints on the tectonic evolution of the Lesser-Greater Caucasus continental collision //

Earth Planet. Sci. Lett. 2018. Vol. 481. P. 154-161. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.007

- 44. Complex of equipment for storage and processing of astronomical data of SAI MSU. https://istina.msu.ru/ equipment/card/9351754/ (Accessed January 9, 2022).
- 45. GAMIT/GLOBK. http://geoweb.mit.edu/gg/ (Accessed January 19, 2022).
- 46. FRC EGS RAS. http://www.ceme.gsras.ru (Accessed January 19, 2022).

Contemporary Tectonic Movements of the Western Caucasus and the Pre-Caucasus Based on Satellite-Geodetic Observations

V. K. Milyukov^a, A. P. Mironov^a, *, A. N. Ovsyuchenko^b, A. V. Gorbatikov^b, G. M. Steblov^b, ^d, A. M. Korzhenkov^b, V. N. Drobyshev^c, Kh. M. Khubaev^c, A. O. Agibalov^b,

A. A. Sentsov^b, U. Dogan^e, S. Ergintav^f

^aSternberg Astronomical Institute. Lomonosov Moscow State University (SAI MSU). bld. 13, Universitetsky prosp., 119234 Moscow, Russia

^bSchmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences (IFZ RAS), bld. 10, B. Grusinskava str., 123242 Moscow, Russia

^cVladikavkaz, Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (VNC RAS),

bld. 22, Markusa str., 362027 Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, Russia

^dGeophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS).

bld. 189, Lenin prosp. 249035 Obninsk, Kaluga Region, Russia

^eYildiz Technical University, Department of Geomatics Enginering, Davutpasa Kampusu 34220 Esenler/Istanbul, Turkey ^fBogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, 34684 Cengelköy-Istanbul, Turkey *e-mail: almir@list.ru

The velocity field of the Western Caucasus and the Pre-Caucasus research region based on results of GNSS observations is presented. In the ITRF2014 reference frame this field shows the coordinated movement of the region in the north-north-east direction with the average velocity of 27-28 mm/year. Relative to fixed (moveless) Eurasia number of geodynamic features of the main tectonic structures of the region are identified. In the northern part of the region, a fan-shaped pattern of horizontal velocity vectors is observed. reflecting the rotation of the northern wing of the North Azov flexural-fault zone counter-clockwise and, accordingly, contemporary left-shift displacements. To detail the geodynamic situation, the velocity field is compared with two geodetic profiles. The first profile crosses in the south-west-north-east direction the mountain belt of the Western Caucasus, the West Kuban foredeep basin and the Scythian platform which are the main geological structures of the region. The second profile is less extended, but also crosses the entire mountain belt of the Western Caucasus, the West Kuban foredeep basin and part of the monocline of the Central Sector of the North Caucasus. Within the Greater Caucasus and the West Kuban foredeep basin, transverse compression of the main morphostructures is observed at a rate of up to 1 mm/year, and shear displacements prevail in the Pre-Caucasus. The mountain belt of the Western Caucasus is in conditions of longitudinal compression. East of the Tuapse Fault Zone, the mountain belt is experiencing longitudinal extension. At the same time, the intensity of deformation processes on the Southern Slope area is higher than in the Pre-Caucasus. Currently, the level of seismic activity in the Western Caucasus is low and moderate.

Keywords: North Caucasus, Pre-Caucasus, contemporary movements of the Earth's crust, geodynamics, satellite geodesy, Global Navigation Satellite System, GNSS