

Анатолий Георгиевич Гурбанов

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), ведущий научный сотрудник, Россия, г. Москва; Владикавказский научный центр Российской академии наук, Комплексный научно-исследовательский отдел, ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, Россия, г. Владикавказ, e-mail: ag.gurbanov@yandex.ru

Вадим Константинович Милуков

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ), заведующий лабораторией, Россия, Москва; Владикавказский научный центр Российской академии наук, Комплексный научно-исследовательский отдел, старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук, Россия, г. Владикавказ, e-mail: vmilyukov@yandex.ru

Виктор Магалимович Газеев

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), научный сотрудник, Россия, г. Москва; Владикавказский научный центр Российской академии наук, Комплексный научно-исследовательский отдел, старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, Россия, г. Владикавказ, e-mail: gazeev@igem.ru

Алексей Борисович Лексин

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), ведущий программист, Россия, г. Москва, e-mail: lexin@igem.ru

Александр Яковлевич Докучаев

Институт геологии рудных месторождений Российской академии наук, ведущий научный сотрудник, заведующий Рудно-петрографическим сектором-музеем, кандидат геолого-минералогических наук, Россия, г. Москва, e-mail: alexandre-dokuchayev@yandex.ru

Ольга Александровна Гурбанова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, ассистент кафедры минералогии и кристаллохимии, кандидат химических наук, Россия, г. Москва, e-mail: gur_o@mail.ru

Оценка векторов скорости современных горизонтальных и вертикальных смещений литосферных блоков на территории Большого Кавказа и их геодинамическая интерпретация (по данным ГНСС)

Аннотация. В мировой практике Глобальные Навигационные Спутниковые Системы (ГНСС) используются как измерительное средство при решении локальных и глобальных задач геодинамики. С 1991 г. они начали использоваться при изучении современной геодинамики Большого Кавказа (БК). Анализ предварительных результатов (проведено две эпохи измерений, 06.1993 г. и 09.1994 г.) на 21 станции GPS-TRIMBLE по Российско-Германскому проекту "WEGENER" (руководитель Р. Wilson, IFAG г. Кельн ФРГ) приведен в данной статье. Станции располагались в структурно-формационных зонах (СФЗ) Бечасынской, Передового и Главного хребтов и Южного склона БК так, чтобы были получены измерения скоростей и векторов направленности перемещений блоков в каждой СФЗ. Реперный пункт в станции Зеленчукской стабилен по сравнению с международным реперным пунктом на Скандинавском щите. Известно, что большие (10–17 мм/год) скорости горизонтальных смещений с векторами смещений с СЗ и ССЗ ориентировками характерны для Аравийской плиты и смежных частей Средиземноморского подвижного пояса. Векторы перемещений с ССВ ориентировкой (скорости 9–12 мм/год) характерны для ЮВ части Малого Кавказа, что подтверждает северный дрейф Аравийской плиты. Перед фронтальной частью выступа Аравийской плиты векторы скоростей (2–4 мм/год) имеют СВ ориентировку. На севере БК в Ставропольском сводовом поднятии установлены величины векторов СВ и СЗ ориентировок в пределах 2.5–3 мм/год, что свидетельствует о неощутимом влиянии здесь северного дрейфа Аравийской плиты. Характер распределения векторов скоростей горизонтальных смещений в пунктах измерений подтверждает наличие Транскавказского поперечного поднятия (ТПП).

По скорости аплифта БК четко подразделяется на два крупных блока: Западный – от г. Геленджик на западе до долины р. Баксан на востоке, и Восточный – от долины р. Баксан до долины р. Урух на востоке. В Западном блоке максимальные скорости аплифта (5–6 мм/год) установлены только в районе г. Геленджик, что может быть обусловлено воздыманием в пределах Туапсинской поперечной структуры. В Восточном блоке установлено, что на южной окраине Скифской платформы, в районе лакколитов Кавминвод, скорость подъема достигает 6 мм/год, а значительно южнее, в СФЗ Передового и Главного хребтов БК, средняя скорость подъема центральной части блока составляет 13 мм/год.

Ближние к нашим данным о скоростях современных поднятий на БК были получены Д.А. Лилиенбергом с соавторами в результате трех эпох (1925/27–1946/50; 1946/50–1970/75 и 1970/75–1985/92 гг.) повторного нивелирования.

Ключевые слова: скорости вертикальных и горизонтальных смещений литосферных блоков, структурно-формационные зоны, Большой Кавказ, Транскавказское поперечное поднятие.

Anatoly G. Gurbanov

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Leading Researcher, Russia, Moscow; Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Integrated Research Department, Leading Researcher, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Russia, Vladikavkaz, e-mail: ag.gurbanov@yandex.ru

Vadim K. Milyukov

Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University (SAI MSU), Head of Laboratory, Russia, Moscow; Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Integrated Research Department, Senior Researcher Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Russia, Vladikavkaz, e-mail: vmilyukov@yandex.ru

Victor M. Gazeev

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Researcher, Russia, Moscow; Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Integrated Research Department, Senior Researcher, PhD, Russia, Vladikavkaz, e-mail: gazeev@igem.ru

Alexey B. Leksin

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Lead Programmer, Russia, Moscow, e-mail: lexin@igem.ru.

Alexander Ya. Dokuchaev

Institute of Geology of Ore Deposits of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, Head of the Ore-Petrographic Sector-Museum, PhD, Russia, Moscow, e-mail: alexandre-dokuchayev@yandex.ru.

Olga A. Gurbanova

M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Assistant of the Department of Mineralogy and Crystal Chemistry, PhD, Russia, Moscow, e-mail: gur_o@mail.ru

Estimation of the velocity vectors of modern horizontal and vertical displacements of lithospheric blocks in the territory of the Great Caucasus, according to GNSS data and their geodynamic interpretation

Abstract. In world practice, the Global Navigation Satellite System (GNSS) is used as a measuring tool for solving local and global problems of geodynamics. Since 1991, it has been used to study the modern geodynamics of the Greater Caucasus (GC). Analysis of preliminary results (two measurement epochs were carried out - 06.1993 and 09.1994) at 21 GPS-TRIMBLE stations according to the Russian-German project "WEGENER" (head P. Wilson, IFAG Cologne, Germany) is provided in this article. The stations were located in the structural-formational zones (SFZ): Bechasynskaya, Peredovoy and Glavnoy Ridges and the southern slope of the BC in such a way that the measurements of the velocities and direction vectors of displacements of blocks will characterize those in each SFZ. The reference point in the village of Zelenchukskaya is stable compared to the international reference point on the Scandinavian shield. It is known that large (10-17 mm / yr) rates of horizontal displacements with displacement vectors with NW and NNW orientations are characteristic of the Arabian plate and adjacent parts of the Mediterranean mobile belt. Displacement vectors with NNE orientation (velocity of 9-12 mm / year) are typical for the southeastern part of the Lesser Caucasus, which confirms the northern drift of the Arabian plate. In front of the frontal part of the Arabian plate protrusion, the velocity vectors (2-4 mm / yr) have a NE orientation. In the north of the GC in the Stavropol arch uplift, the values of the NE and NW vectors are established orientations within the range of 2.5-3 mm / year, which indicates that the influence of the northern drift of the Arabian plate is not perceptible here. The nature of the distribution of the horizontal displacement velocity vectors at the measurement points confirms the presence of the Transcaucasian transverse uplift (TTU)..

According to the uplift velocities, the GC is clearly divided into two large blocks. Western block - from the city of Gelengik in the west and to the valley of the river. Baksan in the east. Eastern block - from the river valley. Baksan and to the valley of the river. Uruk in the east. In the Western block, the maximum uplift rates, 5-6 mm / year, were established only in the area of Gelengik, which is probably due to the uplift of the transverse structure in the Tuapse. In the Eastern block, it was found that on the southern edge of the Scythian platform, in the area of laccoliths Kavminvod, the ascent rate reaches 6 mm / year, and much further to the south, in the SFZ of the Peredovoy and Glavnoy Ridges, the average rate of ascent of the central part of the block is 13 mm / year. Lilienberg D.A. with co-authors as a result of three epochs (1925 \ 27-1946 / 50; 1946 / 50-1970 / 75 and 1970 / 75-1985 / 92) of repeated leveling.

Keywords: velocities of vertical and horizontal movements of lithospheric blocks, structural-formational zones, Greater Caucasus, Transcaucasian transverse uplift

ВВЕДЕНИЕ

Большой Кавказ (БК) относится к числу наиболее активных в геодинамическом отношении регионов России, что обусловлено взаимодействием Евразийской и Аравийской литосферных плит с проявлением типичной коллизионной тектоники

(включая деформации сжатия в субмеридиональном направлении, растяжения в субширотном направлении и общее поднятие как региона, так и составляющих его мелких блоков), новейшего вулканизма и сейсмических событий, чем и был вызван повышенный интерес к проведению в этом регионе комплексных исследований [47]. При этом учитыва-

лось, что изучение динамики движения и взаимодействия плит и реологии континентальной литосферы является одной из важных фундаментальных проблем геотектоники [48]. В итоге на территории БК выявлены зоны активных сейсмогенерирующих разломов [47], доказано, что проявления современного вулканизма (Эльбрусский, Казбекский и Кельский вулканические центры) приурочены к крупной структуре – Транскавказскому поперечному поднятию (ТПП), и выявлены зоны развития деформации сжатия и растяжения [24, 18].

В настоящее время в науках о Земле преобладает концепция тектоники литосферных плит, по которой формирование внутренней тектонической структуры подвижных поясов (типа Альпийско-Гималайского – АГПП) определяется сближением литосферных плит. Для Большого Кавказа (БК) источником его деформирования является продвижение в субмеридиональном направлении Аравийской литосферной плиты к южной окраине Евразийской плиты. Сближение этих плит установлено в результате GPS-измерений [41, 44, 46]. Считается, что при этих горизонтальных смещениях кавказский сегмент АГПП сжимается, слои осадочных и вулканических пород сминаются в складки, блоки фундамента подвергаются разнонаправленным смещениям, а верхние горизонты коры нарушаются взбросами и надвигами. Ю.Г. Леонов с соавторами считают [11], что северный дрейф Аравийской плиты, влияющий на распределение горизонтальных напряжений, ощущается в пределах Евразийской плиты.

В настоящее время в мировой практике технология ГНСС стала использоваться как основное измерительное средство при решении разнообразных задач геодинамики на разных по значимости уровнях, от изучения деформаций в пределах отдельных частей горных сооружений и до глобальных перемещений литосферных плит [32, 36–39]. Такие измерения для геодинимических целей были начаты в середине 80-х годов прошлого века в США [33] и Европе, а с 1988 г. они проводились в Средиземноморье. С 1991 г. эта система начала применяться для изучения современной геодинимики Кавказской горной системы [25] и для выявления возможных постсейсмических деформаций в эпицентральных зонах сильнейших для Кавказа Рачинского ($M_s = 6.9–7.1$) [24] и Спитакского [26] землетрясений.

Первые исследования современной геодинимики БК с применением GPS-технологий были проведены в начале 1990-х годов в рамках Российско-Американского соглашения о совместных исследованиях в области охраны окружающей среды (Проект IX – исследования по предсказанию землетрясений) [45, 46]. Измерения на Кавказе были продолжением региональных исследований в Средиземноморье (Греция, Турция, Алжир, Египет и Израиль), начатых в 1988 г. В итоге впервые была создана карта современных движений на

Кавказе и прилегающих территориях Азии.

В период 1993–1994 гг. на БК проводились исследования в рамках международного проекта SELF (Sea Level Fluctuations) [30], направленного на изучение измеренных уровней Средиземного и Черного морей. В процессе этих исследований были определены координаты более двадцати пунктов наблюдений, в том числе и пунктов на территории БК «Терскол», «Чегет», «Тырныауз» (Республика Кабардино-Балкария) и «Зеленчукский» (Карачаево-Черкесская Республика), расположенный на территории Зеленчукской радиоастрономической обсерватории «Ратан-600» Института прикладной астрономии (ИПА) РАН, преобразованный позже в постоянно действующую GPS-станцию с априорными координатами: с. ш. $43^{\circ}47'$, в. д. $41^{\circ}34'$, высота над уровнем моря 1 166 м. Станция оборудована принимающим устройством и системой сбора данных, отвечающих стандартам Европейской сети EUREF. В 1997 г. станция Зеленчукская вошла в сеть опорных станций международной службы IGS (International GNSS Service) с кодом ZECK, а сейчас она входит в реализацию международной земной системы отсчета ITRF2014. В течение 10 лет ZECK оставалась единственной постоянно действующей GPS-станцией на БК.

С 2005 г. ГАИШ МГУ возглавил ГНСС-исследования на БК и создал [16] три новых постоянных станции GPS/ГЛОНАСС-наблюдений. «Терскол» (код **TRSK**) расположен на территории Терскольской международной астрономической обсерватории на высоте 3 100 м, на восточном склоне вулканической постройки Эльбруса с априорными координатами: с. ш. $43^{\circ}16'$, в. д. $42^{\circ}30'$, высота 3 122 м над уровнем моря. В стационарном режиме сбора данных станция работает с 2005 г. Станция «Кисловодск» (код **KISL**, координаты с. ш. $43^{\circ}44'$, в. д. $42^{\circ}39'$, высота 694 м) расположена на склоне горы Шатджатмаз (Карачаево-Черкесская Республика) на территории Горной солнечной станции Пулковской обсерватории РАН. Регулярные наблюдения ведутся с 2006 г. Третья станция создана в 2008 г. совместно с Владикавказским научным центром (ВНЦ) РАН и Центром геофизических исследований (ЦГИ) ВНЦ РАН, антенна станции (код **VLKK**, априорные координаты с. ш. $43^{\circ}02'$, в. д. $44^{\circ}41'$, высота 696 м) установлена на крыше здания ЦГИ РАН. Станции **KISL**, **TRSK** оснащены антеннами Topcon CR-G3 Choke Ring и приемниками JAVAD Legacy E L1/L2 GPS/GLONASS. Станция **VLKK** оснащена антенной Javad MarAnt+ и приемником JAVAD Legacy E L1/L2 GPS/GLONASS. Данные с GPS-приемников поступают через Интернет в комплекс хранения и обработки астрономических данных ГАИШ МГУ [16].

Три станции ГАИШ МГУ («Терскол», «Кисловодск», «Владикавказ») и международная станция «Зеленчукская», охватывающие часть территории Республик Кабардино-Балкарии, Карачаево-Черкессии и Северной Осетии-Алании, сформировали

региональную Северо-Кавказскую геодезическую сеть (СКГС). В Северной Осетии Геофизическая служба (ГС) РАН также создала 4 постоянные ГНСС-станции.

Начиная с 2010 года ВЦ РАН проводит работы по созданию ГНСС-сети постоянных станций и полевых пунктов для периодически-повторных наблюдений. Одной из основных задач этих работ является проведение регулярных наблюдений на существующих и вновь созданных станциях и пунктах Осетинской региональной ГНСС-сети для повышения точности первичных оценок координат и скоростей.

В настоящее время Осетинская региональная ГНСС-сеть состоит из 59 ГНСС-пунктов периодически-повторных наблюдений и 9 постоянных ГНСС-станций.

Из 9 ГНСС-станций непрерывных наблюдений 3 станции были созданы в 2019 году ВЦ РАН совместно с другими организациями (станция **KNII** совместно с КНИИ РАН, г. Грозный; станции **ARD2** и **LAZ2** совместно с ЕГС РАН в г. Ардоне и с. Лац) и в 2021 г. 2 станции в Дигорском заповеднике и Цхинвале. В настоящее время станции успешно работают, и по данным годовых наблюдений получены первые оценки векторов скоростей движений этих станций.

Начиная с середины 2010-х гг. усилиями коммерческих компаний Гексагон Геосистемс Рус, Геостройизыскания, Южгеосеть, EFT [EFT] на Большом Кавказе и Предкавказье стали создаваться и поддерживаться сети базовых ГНСС-станций. В рамках научно-технического сотрудничества измерения 24 станций этих компаний доступны ГАИШ МГУ и используются для научных исследований [17].

Существующая достаточно разветвленная сеть ГНСС-станций позволяет решать региональные задачи по изучению основных закономерностей современных движений земной коры на Большом Кавказе.

В результате исследований, проведенных ГАИШ МГУ [16], было получено поле скоростей современных движений в районе Северного склона БК, уточняющее результаты, приведенные в [42, 17]. Оценка скоростей современных движений производилась по результатам измерений на 4 стационарных GPS-станциях СКГС. Точность определения координат находится в пределах 1–3 мм за сутки. Такой же точностью характеризуются координаты опорных станций сети IGS, используемые при анализе. Для поля скоростей Северного Кавказа относительно ITRF2008 характерно быстрое горизонтальное смещение в северо-восточном направлении с одинаковыми скоростями (26–28 мм/год). Подобные движения характерны и для Крыма (код **CRAO**). Опорные станции в центральных стабильных частях Евразийской плиты (коды **ARTU** и **MOBN**) и европейская станция (код **BUCU**, Бухарест) также движутся в северо-восточном направ-

лении, но с меньшими скоростями (24–25 мм/год), а скорость движения опорной станции Тегеран (код **TEHN**) значительно превышает все остальные (34 мм/год) [16].

Для кинематического анализа приведенных различий скоростей движение всех указанных станций сравнивалось с движением Евразийской плиты в целом. Для этого использован набор опорных станций по Северной Евразии, расположенных в стабильных платформенных областях Восточной Европы и Сибири. Движения опорных станций **MOBN** и **ARTU**, расположенных в Восточной Европе, закономерно соответствуют кинематике Евразийской плиты (в пределах погрешностей измерений), так как эти станции входят в число опорных станций, определяющих ее стабильную внутреннюю часть. Северо-Кавказские и Крымская (код **CRAO**) станции характеризуются избыточными значениями скоростей 1–2 мм/год по отношению к расчетным значениям, вытекающим из принятой модели движения Евразии [16]. Современное относительно более быстрое смещение Большого Кавказа обусловлено общим тектоническим движением Альпийско-Гималайского подвижного пояса (АГПП) относительно ITRF и Восточно-Европейской платформы. Станции **ZECK** и **KISL** располагаются в пределах Лабино-Малкинской (Бечасынской) СФЗ центрального сектора Большого Кавказа (БК). Станция **TRSK** – в зоне Главного хребта Центрального Кавказа. Станция **VLKK** располагается в южной, предгорной части Осетинской впадины Терско-Каспийского краевого прогиба Восточного Предкавказья. Выявленное общее сжатие БК является не только прямым следствием давления, оказываемого Аравийской плитой на Кавказский сегмент подвижного, тектонически активного АГПП, но и внутренними геодинамическими причинами: коровым и мантийным диапиризмом; молодым вулканизмом в пределах Транскавказского поперечного поднятия (ТПП); альпийским орогенезом в пределах мегантиклинория БК [9, 2, 19, 27, 29, 30, 40]. Избыточные горизонтальные движения в пограничной области БК относительно Евразийской и Скифской плит обуславливают повышенную сейсмическую и тектоническую активность этой переходной зоны. Проведенные геолого-геоморфологические исследования в зоне Владикавказского разлома показали наличие значительных деформаций четвертичных надпойменных террас в долинах рек Терек, Ардон и др. [6, 15]. Обычно активные разломы имеют на поверхности крутое падение в северных румбах под Осетинскую впадину, а взброшенным является северное, предгорное крыло. По геофизическим данным [3], северная и южная ветви разлома при погружении в северном направлении приобретают на глубине 5–7 км форму листрического взброса, выполаживаясь почти до горизонтального положения. Именно в зоне этого разлома происходит, по-видимому, «поглощение» скорости горизонтальных движений примерно на 1–2 мм/

год [6]. Отметим, что на южном склоне БК при гео-динамических исследованиях в начале 90-х годов XX века с помощью GPS-измерений было установлено, что здесь имеют место горизонтальные смещения, ориентированные в южном направлении, от складчатой системы в сторону Грузинской глыбы. В соответствии с этими данными косейсмическое смещение в очаге Рачинского землетрясения 1990 г. выглядело как пологий надвиг структур Южного склона в сторону Закавказского срединного массива [1, 21]. Следовательно, на северном и южном крыльях мегантиклинория имеются активные разрывные нарушения, свидетельствующие об общем сжатии складчатого сооружения и подтверждающие, кроме наличия внешнего воздействия, и реальность существования внутренних источников деформации.

Что касается современных вертикальных движений БК в целом, то следует отметить следующее [16]: а) невысокая равнинная часть Осетии (**VLKK**) характеризуется небольшими вертикальными движениями 2.5 мм/год; б) наибольшая скорость подъема установлена в горной части Северного Кавказа (станции **KISL** и **TRSK**), порядка 3.5–4.5 мм/год; в) северная часть северного склона БК (пункт «Зеленчукская») имеет умеренную и устойчивую скорость подъема 2.9 мм/год, определенную гравиметрическим и геодезическим методами, результаты которых совпадают в пределах ошибок [43]. Оценки скоростей, полученные в ходе проведенных геодезических работ, показывают, что есть общее небольшое сжатие БК со скоростью порядка 1–2 мм/год. Для выявления деталей геодинамического развития БК необходимо расширение и увеличение плотности геодезической сети станций, позволяющей отслеживать не только крупномасштабные горизонтальные и вертикальные движения региона, но и реализовывать региональный уровень наблюдений.

Попытка создания такой, более плотной сети пунктов GPS-наблюдений была предпринята в рамках Российско-Немецкого проекта «WEGENER» (руководитель Р. Wilson, IFAG г. Кёльн, ФРГ), по которому было проведено только две эпохи измерений (в июне 1993 г. и в сентябре 1994 г.). При его реализации в разных структурно-формационных зонах (СФЗ) БК, с учетом геологических, тектонических и геоморфологических данных, были намечены места для расположения пунктов для GPS-измерений. В процессе полевых работ были уточнены места расположения и обустроены, в соответствии с требованиями для таких исследований, 21 пункт GPS-TRIMBLE, на которых были проведены измерения в июне 1993 г. и в сентябре 1994 г. К сожалению, исследования по этому проекту не были завершены из-за препятствий, чинимых таможенной службой Украины при доставке измерительной аппаратуры из ФРГ в Россию и обратно через территорию Украины. В подготовке обоснования для этого проекта, выборе мест для расположения станций и прове-

дении двух эпох измерений принимали участие А.Г. Гурбанов и В.К. Милюков – авторы данной статьи.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОЕКТУ WEGENER

Пункты располагались (с запада на восток) в следующих СФЗ БК (рис. 1). В зоне Южного склона Западного Кавказа было размещено 5 пунктов (код SIMI – в районе г. Геленджика; коды **TU-K**, **TU-P**, **TU-S** и **TU-G** – в районе г. Туапсе). Все остальные пункты находились на северном склоне БК. Так, пункт «Подскальная» (код **POD**) располагался в правом борту долины р. Большая Лаба, в Лабинно-Малкинской СФЗ на эскарпе верхнеюрских известняков, а пункт Бескес (код **BES**) находился в левом борту долины этой же реки, но уже в Бечасынской СФЗ. Станция «Зеленчук» (код **ZELG**) располагалась на юге Бечасынской СФЗ, южнее радиотелескопа РАТАН-600, в пределах стабильного в тектоническом отношении блока, а пункт «Зеленчукская» (код **ZEL**) находился около астрономической обсерватории на горе Пастухова в СФЗ Передового хребта. Пункт «Теберда» (код **TEB**) находился в долине р. Теберда, в районе мраморного карьера в южной части СФЗ Передового хребта, а пункт «Домбай» (код **DOM**) – в долине этой же реки, но уже в центральной части СФЗ Главного хребта. Пункт «Кубань» (код **KUB**) располагался в истоках р. Кубань в месте слияния ее истоков – рр. Узун-кол и Уллу-кам, в южной части СФЗ Главного хребта. Пункт «Гумбаши» (код **GUM**) был установлен в районе перевала Гумбаши на эскарпе верхнеюрских известняков в Бечасынской СФЗ. Пункты «Соленое» (код **SAL**) и «Журавская» (код **JAR**) были расположены в разных частях Ставропольского сводового поднятия, а пункт «Белый Уголь» (код **BEL**) – в южной части Скифской плиты. В долине р. Баксан находились три пункта: «Тырныауз» (код **TIRI**) – на Мукуланском карьере Тырныаузского вольфрам-молибденового комбината в кровле некариолитового состава в СФЗ Передового хребта; пункт «Чегет» (код **CHE**) – на склоне одноименной горы около метеостанции «КЮН»; пункт «Терскол» (код **TER**) – на лавовом потоке вулкана Эльбрус в районе астрономической обсерватории Терскол, в левом борту долины р. Азау (исток р. Баксан) в южной части СФЗ Главного хребта. На крайнем востоке полигона GPS-измерений, в долине р. Урух, имелось два пункта: «Мацута» (код **MAT**) – в северной части СФЗ Главного хребта; и «Одола» (код **ODO**) – в южной части СФЗ Главного хребта в северном борту Штуллу-Харесской депрессии, сложенной раннеюрскими отложениями с горизонтами вулканитов.

Расстояние между стабильным GPS-репером (станцией) в станице Зеленчукской (код **ZELG**) и пунктами в гг. Геленджике и Туапсе достигает 410 км, а между GPS-репером (код **ZELG**) и пунктом Одола (код **ODO**) в верховьях долины р. Урух – 350

км. Важно подчеркнуть, что пункты наблюдений располагались таким образом, чтобы измерения скоростей перемещений отдельных блоков характеризовали таковые во всех СФЗ БК с северо-запада на юго-восток. Необходимо еще раз отметить, что станция «Зеленчук» (код **ZELG**) находилась на северном склоне БК в районе радиофизической обсерватории в станице Зеленчукской. В тектоническом отношении эта часть Кавказа относится к Лабино-Малкинской (Бечасынской) СФЗ, представляющей собой южную окраину эпигерцинской Скифской платформы. Весьма важно, что реперная станция в станице Зеленчукской устойчива даже по сравнению с международной реперной станцией Onsala на Скандинавском щите в Швеции [29]. Поэтому Лабино-Малкинская СФЗ оказывается стабильным блоком литосферы, который входит в состав единой Евразийской плиты, состоящей из молодой Скифской и древней Восточно-Европейской платформ. Следовательно, станция **ZELG** является реперной для БК, и относительно нее равномерно рассчитывались скорости горизонтальных и вертикальных перемещений литосферных блоков в различных СФЗ БК при проведении GPS-измерений, в том числе и по проекту «WEGENER».

Независимо от наших GPS-исследований по проекту «WEGENER», в рамках Российско-Американского соглашения о совместных исследованиях в области охраны окружающей среды (Проект IX – исследования по предсказанию землетрясений), в 1991 г. на территориях России, Армении и Грузии была создана сеть из 9 пунктов GPS, а в 1996–1997 гг. она была расширена до 25 пунктов, 15 из которых находились на Малом Кавказе, а 10 – на Большом Кавказе. Важно отметить, что из этих 10 пунктов использовались 6 пунктов (Геленджик, Зеленчук, Соленое, Белый Уголь, Уллукам и Мацута), заложенных по проекту «WEGENER», и на них были проведены измерения и по Российско-Американскому проекту IX. В отличие от проекта «WEGENER», по проекту IX была охвачена и самая восточная часть БК – два пункта (Зурамакент и Дубки) были расположены в Дагестане в районе г. Махачкала. В пунктах, расположенных на территории Малого Кавказа, было проведено 3 эпохи измерений (1991, 1994 и 1996 гг.), а на территории БК – только 2 эпохи. Эти исследования были увязаны по программе и срокам с работами по Международному проекту изучения Восточного Средиземноморья, позволившими реконструировать поле деформаций в пределах значительной части АГПП, протяженностью до 3 000 км. Задачей этих исследований был детальный анализ деформационного поля Кавказа на фоне общего взаимодействия Евразийской и Аравийской литосферных плит [29, 31]. При этом учитывался мировой опыт GPS-технологий [20], показавший, что вертикальные компоненты векторов определяются с ошибкой в 2–3 раза большей, чем горизонтальные компоненты, и поэтому в этом проекте были проанализиро-

ваны только горизонтальные компоненты векторов [28, 29]. Полученные данные по направленности векторов современных горизонтальных смещений и величинам скоростей для Кавказа и смежной территории показали крайне неравномерное распределение скоростей по площади (при среднеквадратических ошибках их определения порядка ± 1 мм/год). Было установлено, что большие (до 10–17 мм/год) скорости с преобладающими векторами смещений СЗ и ССЗ ориентировками характерны для Аравийской плиты и смежных частей Средиземноморского подвижного пояса (Восточный Тавр). Векторы перемещений с ССВ ориентировкой (скорости 9–12 мм/год) характерны для ЮВ части территории Малого Кавказа, что хорошо согласуется с данными о северном дрейфе Аравийской плиты [45].

Очень четкие векторы скоростей (19–23 мм/год) на территории Анатолийской микроплиты подтвердили ее латеральное «выжимание» в западном направлении. Однако в более северных районах величины разнонаправленных векторов оказались существенно меньше [29]. Так, в СЗ части Малого Кавказа векторы скоростей становятся меньше (7–9 мм/год) и имеют ориентировку в СВ направлении. Перед фронтальной частью выступа Аравийской плиты (Восточные Понтиды) векторы скоростей (2–4 мм/год) имеют СВ ориентировку. На территории БК и в пределах Ставропольского сводового поднятия величины векторов скоростей (при преобладании СВ и СЗ ориентировок) варьируют в пределах 2.5–3 мм/год (исключение составляет пункт «Дубки» в Дагестане, где вектор имеет ЮВ ориентировку и скорость 10.8 ± 3.2 мм/год). Эти данные полностью подтверждают сделанный нами при проведении работ по проекту «WEGENER» вывод о том, что влияние северного дрейфа Аравийской плиты на севере БК и на южной окраине Скифской плиты становится почти неощутимым. Кроме того, обращает на себя внимание подтверждение полученных нами по проекту «WEGENER» данных [29] о смещении пунктов Уллукам (истоки р. Кубань, скорость 4 мм/год) и Мацута (долина р. Урух, скорость 2.5 мм/год) в южном направлении. Южный дрейф пункта Уллукам можно объяснить двумя причинами. Первая заключается в том, что пункт расположен в полосе субмеридионального раздвига, являющегося элементом ассоциации дислокаций, возникающих в обстановке субмеридионального сжатия [23]. Второй причиной южного дрейфа может быть то, что этот блок расположен в крыле современного Адылсуйского разлома [3, 4], имеющего правосдвиговый характер [46, 22]. Пункт Мацута расположен на древних кристаллических сланцах Дигорского блока в районе восточного окончания Адылсу-Харезского надвига. По нему кристаллические сланцы надвинуты в южном направлении на юрские отложения Штуллу-Харесской депрессии [28], чем и можно объяснить южный дрейф этого пункта, если по этому надвику имеются современные незначительные подвижки.

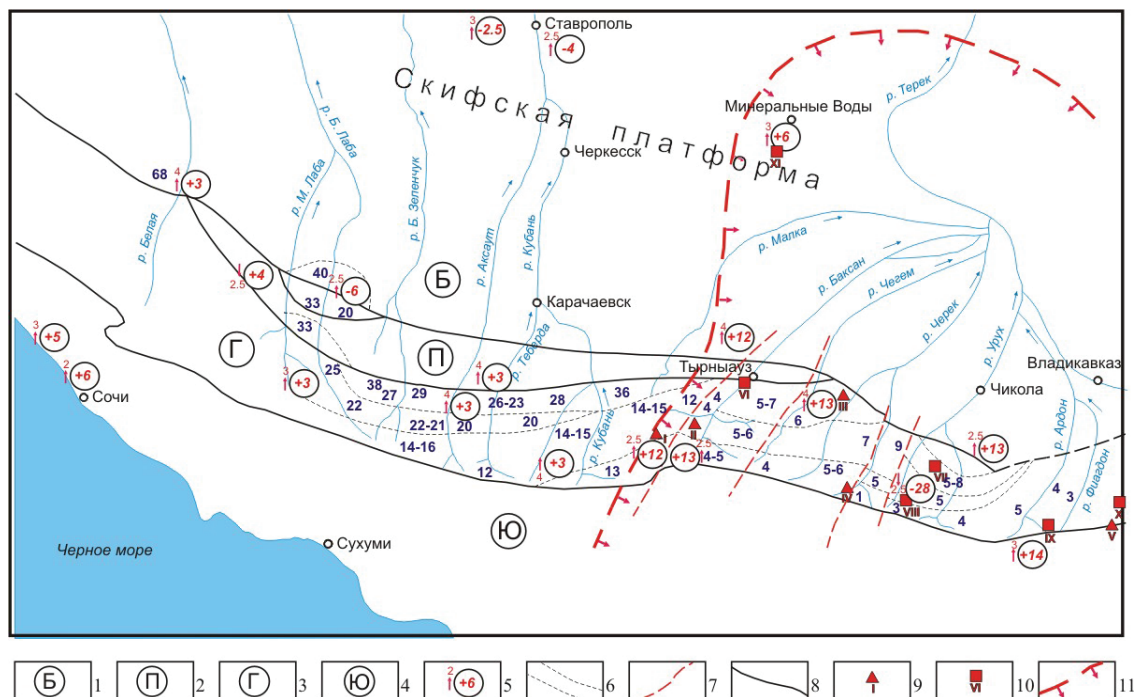


Рис. 1. Схема распределения времени аплифта и современных скоростей и направленности векторов горизонтальных и вертикальных перемещений отдельных блоков в структурно-формационных зонах (СФЗ) Большого Кавказа по геодезическим (GPS-измерения) и фишен-трековым данным (составлена А.Г. Гурбановым [8])

Условные обозначения: 1 – Бечасынская СФЗ; 2 – СФЗ Передового хребта; 3 – СФЗ Главного хребта; 4 – СФЗ Южного склона; 5 – в кружке со знаком «+» – скорость подъема в мм/год, со знаком «-» – скорость опускания в мм/год; стрелка слева от кружка острым концом вверх – горизонтальное смещение с вектором направленности в северных румбах, острым концом вниз – горизонтальное смещение с вектором направленности в южных румбах (цифрой у стрелки показана скорость смещения в мм/год); 6 – условные границы блоков, выделенных по времени аплифта [8]; 7 – зоны активных разломов; 8 – границы структурно-формационных зон; 9 – места проявления новейшего вулканизма: I – Эльбурская кальдера, II – Верхне-Баксанский вулканический узел, III – Верхнечегемская кальдера, IV – район истоков р. Тютюн-су, V – вулкан Казбек; 10 – неонинтрузии и их названия: VI – Эльжуртинская, VII – Сангутинская, VIII – Танадонская, IX – Теплинская, X – Геналдонская, XI – лакколиты Кавминвод; 11 – западная и северная границы Транскавказской поперечной структуры

Следовательно, полученные нами и В.И. Шевченко [29] геодезические данные подтверждают реальность взаимного перемещения Евразийской и Аравийской литосферных плит. Если данные о наличии зоны Транскавказского поперечного поднятия [34, 9] и о положении ее западной границы, сделанные на основании определения времени аплифта для БК, правомерны [8], то они должны найти отражение в результатах определения скоростей вертикальных движений отдельных блоков и в геоморфологических данных. В целом характер распределения векторов скоростей горизонтальных смещений в пунктах измерений подтверждает наличие Транскавказского поперечного поднятия; однако по этим предварительным данным (всего две эпохи измерений) сейчас не представляется возможным уточнить положение северной и восточной границ этой поперечной структуры с достаточной мерой уверенности.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

По 21 пункту имеются данные только по двум эпохам измерений, что не позволяет, в принципе,

решить: отражают ли полученные результаты долговременную, или кратковременную, или случайную направленность смещений. Однако мы считаем возможным рассмотреть результаты, отдавая себе отчет о их предварительном характере, по следующим соображениям. Векторы скоростей во многих случаях демонстрируют явную взаимную согласованность. Например, векторы 4 пунктов на Центральном Кавказе (Белый Уголь, Уллукам, Мацута, Одола) ориентированы в южном направлении (рис. 1).

При полевых наблюдениях использовались высокоточные приемники TRIMBLE серия 4000SSE. За 5 дней (в каждой эпохе) проведены наблюдения на 21 пункте сети в 1993 и 1994 гг. в течение 24 часов ежедневно. В окончательном варианте массив кавказских данных был обработан при условии неподвижности 13 станций сети IGS в системе координат ITRF-93, включая станцию Onsala (в Швеции). Относительно этой станции был вычислен вектор смещения станции «Зеленчукская», показавший, что она не смещается относительно опорной станции Onsala. Это позволило использовать «Зелен-

чукскую» (ZELG) как исходную станцию для вычисления относительных векторов всех остальных 20 пунктов наблюдений по проекту «WEGENER».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОЕКТУ WEGENER И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Был проведен анализ предварительных данных (по результатам двух эпох измерений) о скоростях горизонтальных и вертикальных перемещений, полученных в рамках Российско-Германского проекта «WEGENER». При интерпретации результатов наших измерений, показанных на *рис. 1*, мы отдавали себе отчет в том, что по данным только двух эпох измерений можно лишь приблизительно оценить современные скорости горизонтальных и тем более вертикальных перемещений. Однако полученные предварительные результаты измерений этих скоростей даже сейчас представляют несомненный интерес, и поэтому мы решили их опубликовать. Сводятся они к следующему (см. *рис. 1*):

1. По скорости апlifта (подъема) территория БК четко подразделяется, как и по данным фишен-трекового датирования (по апатиту) времени проявления апlifта, на два крупных блока [8]. Западный (от гг. Геленджика и Туапсе на западе и далее на восток, включая долины рек Белой, Малой и Большая Лаба, Большой Зеленчук, Аксаут, Теберды, Кубани, Малки и до левого борта долины р. Баксан, а на севере – до Ставропольского сводового поднятия – ССП) поднимался со средней скоростью 3–4 мм/год и с горизонтальными скоростями смещения при направленности компонентов векторов в С-В и (реже) в С-З направлениях со скоростями, варьирующими в пределах от 3 до 4 мм/год, а в районе ССП – 2.5 мм/год. Восточный блок (от долины р. Баксан включительно и далее на восток, включая долины рек Чегем, Черек-Балкарский, Черек-Безенгийский, Урух, Ардон и Фиагдон) поднимался со средней скоростью 6 мм/год (в пределах северного окончания ТПП, находящегося на юге Скифской плиты) и со скоростью 12–14 мм/год в расположенной южнее СФЗ Главного хребта при направленности векторов в С-В направлении. Важно подчеркнуть, что граница между Западным и Восточным блоками полностью совпадает с западной границей зоны ТПП, установленной по результатам определения времени проявления апlifта отдельных блоков земной коры методом фишен-трекового датирования апатитов [8], а также по геоморфологическим данным [7] и по данным о глубине залегания кровли астеносферы [10].

В пределах Западного блока наблюдаются следующие особенности в характере распределения современных скоростей вертикальных перемещений: а) максимальные скорости апlifта, варьирующие в пределах 5–6 мм/год, зафиксированы в районе гг. Геленджика и Туапсе (возможно, это

обусловлено воздыманием в зоне Туапсинской поперечной структуры); б) опускания зафиксированы в долине р. Большая Лаба, пункт «Бескес» (-6 мм/год) и на южном склоне Ставропольского свода – пункты «Журавская» (-2.5 мм/год) и «Соленое» (-4 мм/год). В пределах Восточного блока установлено, что: а) на южной окраине Скифской платформы, в районе развития лакколитов Кавминвод, скорость подъема достигает 6 мм/год, а значительно южнее, в СФЗ Передового и Главного хребтов, вдоль западной границы зоны ТПП, она уже составляет 12 мм/год; средняя же скорость подъема центральной части этого блока составляет 13 мм/год; б) опускание (с максимальной скоростью до -28 мм/год) установлено только в одном маленьком блоке в долине р. Урух (пункт «Одола»), приуроченном к зоне крупного субширотного разлома, ограничивающего с севера тектонический клин (Штуллу-Харезскую депрессию), сложенный вулканогенно-осадочными породами нижнеюрского возраста.

Очень важно отметить, что близкие к нашим данные о скоростях современных поднятий на территориях Большого Кавказа и Закавказья были получены в результате трех эпох (1925/27–1946/50; 1946/50–1970/75 и 1970/75–1985/92 гг.) повторного нивелирования [12, 13, 14]. Этими исследователями (Д.А. Лилиенберг и др.) были установлены следующие скорости современных поднятий в пределах: Предкавказья – в Ставропольском сводовом поднятии (+2)–(+4) мм/год; Северо-Западного Кавказа – 0–(+4) мм/год; в зоне Главного хребта (в целом) – (+8)–(+10) мм/год; в зоне «поперечного блока» (или зоны ТПП в нашем понимании) – (+10)–(+15) мм/год; а также на Армянском вулканическом нагорье – (+10)–(+15) мм/год. Следовательно, и по этим инструментальным данным [13] максимальные скорости современного апlifта наблюдаются в пределах зоны Транскавказского поперечного поднятия (ТПП).

2. Анализ распределения скоростей горизонтальных перемещений показал, что имеется устойчивая ориентация векторов скоростей (2–4 мм/год) как в С-З, С-СЗ направлениях, характерных для территории Аравийской плиты, так и в С-В направлении, характерном для юго-восточной части Малого Кавказа. Эти данные подтверждают существующие представления о северном дрейфе Аравийской литосферной плиты [42, 43, 29]. Северо-западная направленность векторов скоростей горизонтальных перемещений в пределах Ставропольского поднятия (пункты «Журавская» – 3 мм/год и «Соленое» – 2.5 мм/год), скорее всего, свидетельствует о том, что влияние северного дрейфа Аравийской плиты здесь практически не ощущается. Смещение к югу блока, расположенного в правом борту долины р. Большая Лаба (пункт «Подскальное» – 2.5 мм/год), вероятно, обусловлено надвиговой структурой, находящейся в породах юрского возраста и падающей на север,

но смещения по ней были в южном направлении, т. е. вверх по восстанию пород. Еще в одном блоке (пункт «Мацута» в долине р. Урух), сложенном палеозойскими гранитами и протерозойскими метаморфическими породами и приуроченном к восточному окончанию крупной надвиговой структуры со смещением блока к югу со скоростью до 2.5 мм/год.

Как показали геодезические измерения, некоторые надвиговые пластины в зоне Главного хребта Большого Кавказа (БК), смещаясь в южном направлении, удаляются от пункта «Зеленчук» (ZELG) и стабильной Лабино-Малкинской (Бечасынской) зоны. В результате ширина БК, по этим геодезическим данным, в настоящее время не уменьшается, а увеличивается [21]. При интерпретации полученных данных необходимо учитывать, что надвиги – это дислокации, связанные с напряжениями субгоризонтального сжатия, а механизмы очагов землетрясений также свидетельствуют о том, что обстановка субгоризонтального сжатия существует здесь до настоящего времени. Сочетание экспериментальных данных (увеличение ширины АГПП при одновременном существовании активных надвигов и при напряжениях субгоризонтального сжатия) может быть объяснено допущением, что современный тектогенез и сейсмичность БК (и С-З части Малого Кавказа, расположенной севернее офиолитового Севано-Акеринского пояса) связаны не со сближением плит, микроплит земной коры, а с увеличением площади и объема слоистых пород, обусловленным притоком в них глубинными гидротермами дополнительного минерального вещества. В итоге слоистые породы не умещаются в прежние объемы, что приводит к надвиговым перемещениям и смятию в складки этих пород и имеет только местный характер. Анализ геологических данных позволяет считать, что этот вывод правомерен и для предыдущей геологической истории кавказского сегмента АГПП [28].

К аналогичному выводу, на основе анализа полей тектонических напряжений, пришел П.Н. Николаев [20]: «...тектодинамические системы разных рангов имеют разные источники энергии, различный генезис, механизм формирования» (с. 132).

В целом на Большом Кавказе по распределению величин скоростей горизонтальных смещений пунктов GPS-измерений не наблюдается такой четкой картины с выделением двух различных крупных блоков и, соответственно, западной границы зоны ТПП, как это было установлено по результатам фишен-трекового датирования апатитов [8] и по предварительным данным по скоростям вертикальных перемещений.

Рассмотрим геоморфологические особенности строения Большого Кавказа, обусловленные различными скоростями и временем проявления вертикальных и горизонтальных перемещений отдельных литосферных блоков БК [7], начиная с долины р. Белой на западе и до долины р. Терек на

востоке (но только для широты, где эти реки «прорезают» эскарп Скалистого хребта (СХ), сложенный верхнеюрскими и меловыми известняками). В первую очередь, в этих пересечениях обратим внимание на ширину долин рек в тех местах, где они пересекают эскарп СХ, начиная с запада и на восток. Так, ширина долин рек Белой, Малой и Большая Лаба, Уруп, Большой и Малый Зеленчук, Аксаут и Кубань является практически стабильной и варьирует в пределах от многих сотен метров до километра. Следовательно, скорость подъема земной поверхности здесь была примерно одинаковой и небольшой, так как вышеуказанные реки успели довольно интенсивно «разработать» свои долины в ширину. Иная картина наблюдается восточнее, начиная с долины р. Баксан, где ширина долин рек резко сужается до первых сотен и даже десятков метров. Например, ширина долины р. Чегем в районе знаменитых «Чегемских водопадов» составляет всего 30–40 м, долины рек Черек Балкарский и Черек Безенгийский – до 60–100 м, долины р. Урух в районе «Чёртового моста» – до 50 м, долины р. Ардон – до 150 м, долины р. Фиагдон – до 150–200 м, долин рек Гизельдон и Геналдон – до 60–100 м, Терека – до 250–300 м. Из приведенных выше данных видно, что территория от долины р. Баксан на западе и далее на восток до долины р. Терек поднимается с такой большой скоростью [35], что реки не успевают «разрабатывать» свои долины в ширину, а только углубляют их, «пропиливая» подстилающие породы и образуя узкие каньонообразные ущелья глубиной в несколько сотен метров. Кроме того, анализ расположения высотных отметок горных вершин в СФЗ Главного хребта также выявил очень важную закономерность, заключающуюся в том, что их максимальные значения (от 4 200 м до 5 642 м) находятся в основном в пределах блока, расположенного к востоку от долин рек Малка и Баксан и до долины р. Терек включительно. Кроме того, днища долин рек в Восточном блоке имеют более высокие отметки (на 150–200 м) по сравнению с днищами долин рек в Западном блоке. Здесь необходимо подчеркнуть, что границы (особенно западная) этого поднимающегося блока полностью совпадают с границами ТПП, выделенного по геологическим, фишен-трековым и геодезическим данным. Следовательно, наличие структуры, испытывающей современный интенсивный аплифт, подтверждается и независимыми геоморфологическими данными.

Анализ карты рельефа подошвы литосферы на территории Кавказа [10] показал, что на глубине 97–110 км под западной границей зоны ТПП расположена кровля линейного выступа в астеносфере субмеридионального простирания, к востоку от которого кровля астеносферы плавно опускается на глубину до 120 км, а к западу от выступа кровля астеносферы резко опускается на глубину 140 км. Следовательно, формирование ТПП с при-

уроченными к нему проявлениями новейшего и современного вулканизма (вулканы Эльбрус, Казбек, Кабарджин, Кельский вулканический район, вулканические районы Армении и др.) непосредственно связано с активизацией протекающих в мантии глубинных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа приведенных данных следует, что на современном уровне геолого-геодезической, геофизической и геоморфологической изученности территории Большого Кавказа с достаточной степенью уверенности можно выделить зону (структуру) Транскавказского поперечного поднятия [5]. Ее западная граница проходит по левому борту долины р. Баксан и трассируется (с юга на север) проявлением неоплейстоцен-голоценового (Эльбрусский вулканический центр) и позднеплиоценового (деллениты р. Кыртык, Эльджуртинский гранитный массив) магматизма, а северная расположена в районе Кавминвод и фиксируется внедрением позднемиоценовых лакколитов, сложенных субщелочными гранитоидами. GPS-данных для суждения о более точном местоположении восточной границы этой структуры, к сожалению, пока недостаточно.

Установленное горизонтальное субмеридиональное перемещение, вероятно, является результатом дрейфа к северу расположенной южнее Малого Кавказа Аравийской плиты Гондваны (хотя не исключено и иное объяснение). Например, существование зоны расширения литосферы под Араратской вулканической областью может также

вызвать перемещение Мисхано-Зангезурского массива к северу.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что влияние северного дрейфа Аравийской плиты на севере Большого Кавказа и на южной окраине Скифской плиты становится почти неощутимым, т. е. постепенно затухает в северном направлении.

Данные о скоростях вертикальных и горизонтальных перемещений отдельных блоков в пределах различных СФЗ Большого Кавказа, кроме научного, имеют и практическое значение, так как при их помощи можно будет выбрать в пределах БК безопасные места для строительства отелей, турбаз, малых ГЭС, канатных подъемников, автомобильных и железных дорог.

Кроме того, анализ имеющихся GPS-данных показал, что необходимо продолжить эти измерения на Кавказе, что повысит точность полученных результатов, для чего необходимо спустить имеющуюся сеть пунктов и в итоге получить более детальную картину распределения современных движений. Предполагаемые места расположения пунктов GPS приведены на *рис. 1*, но необходимо добавить еще 4 пункта на территориях Чеченской и Дагестанской республик и еще один пункт в висячем крыле Адылсу-Харесского надвига (в долине р. Черек-Балкарский). Проведенные измерения на такой сети пунктов позволят более обоснованно оценить применимость к БК различных геотектонических концепций.

Работа подготовлена в рамках Базовой темы Лаборатории петрографии ИГЕМ РАН «Петрология и минералогия магматизма конвергентных и внутриплитных обстановок: история формирования крупных континентальных блоков» (регистрационный № ЕГИСУ НИОКТР 121041500222-4) и в рамках плана НИР КНИО ВНИЦ РАН при финансовой поддержке гос. темы регистрационный номер АААА-А19-119040190054-8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арефьев С.С., Рогожин Е.А., Быкова В.В., Дорбат К. Глубинная структура очаговой зоны Рачинского землетрясения по сейсмотомографическим данным // *Физика Земли*. 2006. № 1. С. 30–44.
2. Белоусов В.В. Большой Кавказ как тектоническая лаборатория // *Проблемы геодинамики Кавказа*. – М.: Наука, 1982. С. 9–13.
3. Богатилов О.А., Гурбанов А.Г. Комплексные исследования Эльбурского и Казбекского вулканических центров: мониторинг и прогноз // *Вестн. Владикавказского научн. центра РАН*, 2003. Т. 3. № 2. С. 15–28.
4. Богатилов О.А., Рогожин Е.А., Гурбанов А.Г. и др. Тектоника и геодинамика континентальной литосферы // *Материалы XXXVI Тектонического совещания*. Т. 1. – М.: ГЕОС, 2003. С. 48–54.
5. Большой Кавказ в альпийскую эпоху (ред. Ю.Г. Леонова). – М.: ГЕОС, 2007. 368 с.
6. Горбатилов А.В., Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А. и др. Строение зоны Владикавказского разлома по результатам изучения комплексом геолого-геофизических методов // *Вопросы инженерной сейсмологии*, 2010. Том 37. № 3. С. 36–44.
7. Гурбанов А.Г., Катов Д.М., Краль Я. Выражение зоны максимального проявления коллизии, вызванной столкновением Аравийской и Евразийской плит, в рельефе Большого Кавказа по фишен-трековым (апатит) и геоморфологическим данным // *Междунар. совещ. XXIV пленум геоморфол. комиссии РАН*. Краснодар, 6–10 октября 1998. С. 299–301.
8. Гурбанов А.Г., Краль Я., Газеев В.М. и др. Время проявления аплифта в различных структурно-формационных зонах Северного Кавказа (по данным фишен-трекового анализа апатитов) // *Вестник ВНИЦ РАН*, 2022. Т. 22. № 1. С. 55–68.
9. Гамкрелидзе И.П., Гиоргобиани Т.В. Проблемы Альпийских деформаций Большого Кавказа и прилегающих территорий // *Геология и минеральные ресурсы Большого Кавказа* (под ред. Е.Е. Милановского и Н.В. Короновского). – М.: Наука, 1987. С. 35–40.
10. Карта рельефа подошвы литосферы СССР и сопредельных территорий (под ред. В.В. Соловьева). – Л.: ВСЕГЕИ. 1986.
11. Леонов Ю.Г., Гущенко О.И., Колп М.Л., Расцветаев Л.М. Взаимосвязь позднекайнозойских напряжений и деформаций в Кавказском секторе Альпийского пояса и в его северном платформенном обрамлении // *Геотектоника*, 2001. № 1. С. 36–59.
12. Лилиенберг Д.А., Кафтан В.И., Кузнецов Ю.Г., Серебрякова Л.И. Картографические модели вариаций современных тектонических движений морфоструктур Кавказа и Закавказья для различных эпох // *Геоморфология*, 1997. № 4. С. 63–75.
13. Лилиенберг Д.А., Матцкова В.А. и др. Карта современных вертикальных движений и морфоструктуры Кавказа // *Проблемы современных движений земной коры*. – М.: СГК АН СССР, 1969. С. 142–156.

14. Лилиенберг Д.А., Яценко В.Р. Основные тенденции геодинамики горных морфоструктур Большого Кавказа по новым геодезическим данным // Геодезия и картография, 1991. № 2. С. 21–28.
15. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. – М.: Недра, 1968. 483 с.
16. Миллюков 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
17. Миллюков В.К., Миронов А.П., Овсяченко А.Н., Горбати-ков А.В., Стеблов Г.М. и др. Современные тектонические движения Западного Кавказа и Предкавказья по ГНСС наблюдениям // Геотектоника, 2022. № 1. С. 51–67.
18. Новейший и современный вулканизм на территории Рос-сии (Отв. ред. Н.П. Лаверова). – М.: Наука, 2005. 604 с.
19. Павленкова Г.А. Строение земной коры Кавказа по про-филям ГСЗ Степное–Бакуриани и Волгоград–Нахичивань (результаты переинтерпретации первичных данных) // Физика Земли, 2012. № 5. С. 16–25.
20. Николаев П. Методика тектонодинамического анализа. – М.: Недра, 1992. 296 с.
21. Прилепин М.Т., Баласанян С., Баранова и др. Изучение кинематики кавказского региона с использованием GPS технологии // Физика Земли, 1997. № 6. С. 68–75.
22. Природные процессы на территории Кабардино-Балка-рии (под ред. Н.П. Лаверова). – Москва-Нальчик: РАН и Мин. образ. и науки РФ, 2004. 438 с.
23. Расцветаев Л.М., Бирман А.С., Курдин Н.Н. и др. Пара-генетический анализ альпийских дизъюнктивов в районе Минеральных Вод // Геология и минеральные ресурсы Боль-шого Кавказа (ред. Е.Е. Милановского и Н.В. Короновского). – М.: Наука, 1987. С. 96–106.
24. Рогожин Е.А., Богачкин Б.М. Альпийская и новейшая тектоника района Рачинского землетрясения // Физика Земли, 1993. № 3. С. 3–11.
25. Рогожин Е.А., Собисевич Л.Е., Нечаев Ю.В. и др. Геоди-намика, сейсмотектоника и вулканизм Северного Кавказа. – М.: Регион. обществ. организация ученых по пробл. при-кладн. геофизики, 2001. 338 с.
26. Рогожин Е.А., Филип Э. Геолого-тектоническое изуче-ние очаговой зоны Спитакского землетрясения // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1991. № 11. С. 3–17.
27. Рогожин Е.А., Горбатилов А.В., Заалишвили В.Б., Сте-панова М.Ю., Зайцева Н.В., Харазова Ю.В. Новые данные о глубинном строении, тектонике и геодинамике Большого Кавказа // Материалы 46 (XLVI) Тектонического совещания «Тектоника складчатых поясов Евразии: сходство, разли-чие, характерные черты новейшего горообразования, ре-гиональные обобщения». – М.: ГЕОС, 2014. С. 125–130.
28. Шевченко В.И. Происхождение структур горизонталь-ного сжатия в складчатом сооружении. – М.: Наука, 1984. 160 с.
29. Шевченко В.И., Гусева Т.В., Лукк А.А. и др. Современная геодинамика Кавказа (по результатам GPS-измерений и сейсмическим данным) // Физика земли. 1999. № 9. С. 3–18
30. Шолпо В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А. Складчатость Большого Кавказа. – М.: Наука, 1993. 192 с.
31. Becker M., Zebini S., Barker T. et al. Assessment of height variation by GPS at Mediterranean and Black Sea cost tide gauges from the SELF projects // Global and Planetary Change, 2002. Vol. 34. Is. 1-2. P. 5-35
32. Dong D.N., Herring T., King R.W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data // J. Geod. 1998. № 72. P. 200–214
33. Feigl K.L., Agnew D.C., Bock Y., Dong D.N., Donnellan A., Hager B.H., Herring T.A., Jackson D.D., King R.W., Larsen S.K., Larson K.M., Murray M.H., Shen Z.K. Measurement of the velocity field in central and southern California // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98. P. 21667–21712.
34. Gamkrelidze I.P. Geodynamic evolution o.f the Caucasus and adjacent areas in Alpine time // Tectonophysics, 1986. Vol. 127. P. 261–275.
35. Grun R., Tani A., Gurbanov A. et al. A new method for the estimation of cooling and denudation rates using paramagnetic centers in quartz: A case study on the Eldzhurtinskiy Granite, Caucasus // J. of Geophys. Res. 1999. N 104. P. 17531–17549.
36. Herring T.A. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program Version 10.1 Internal Memorandum, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, 2003.
37. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Department of Earth & Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. 2010.
38. Herring T.A. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Technical Report. Mass. Inst. of Technology. Cambridge, MA, 1995.
39. King R.W., Bock Y. Documentation for the GAMIT analysis software, release 9.7, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1998.
40. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography // Solid Earth, 2012. № 3. P. 327–337.
41. McClusky S., Balasanian S., Barka A. Demitre et al. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus // J. Geophys. Res. 2000. Vol. 105. Is. B3. P. 5695–5719.
42. Milykov V., Zharov V. et al. Monitoring crustal deformations in the Northern Caucasus using precision long base laser strainmeter and the GPS/GLONASS net work // J. Geod. 2010. № 49. P. 216–223.
43. Milykov V.K., Yushkin V.D., Kopaev A. et al. Monitoring current vertical movement of the Northern Caucasus by Absolute and Gravimetry // Measurement techniques, 2014. Vol. 56. Is. 10. P. 1105–1110.
44. Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision // Tectonophysics, 1989. V. 161. P. 1–21.
45. Reilinger R., McClusky S., Souter B. et al. Preliminary estimates of plate convergence in the Caucasus collision zone from global positioning system measurements // Geophys. Res. Lett. 1997. Vol. 24. № 14. P. 1815–1818.
46. Reilinger R., McClusky S., Verrvant P. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interaction // J. Geophys. Res. 2006. vol. 111. Is. B0 5411.
47. Rogozhin E.A., Gurbanov A.G., Marakhanov A.V. et al. Ancient earthquake dislocations in the area of Elbrus Volcano, North Caucasus // Russian Jour. Earth Sci, 2004. V. 6. N 4. P. 1–22.
48. Thatcher W. GPS constraints on the kinematics of continental deformation // International Geology Review, 2003. Vol. 45. P. 191–212.

REFERENCES

1. Arefev S.S., Rogozhin E.A., Bykova V.V., Dorbat K. Glubinnaya struktura ochagovoy zony Rachinskogo zemletryaseniya po sejsmotomograficheskim dannym // Fizika Zemli. 2006. № 1. С. 30–44.
2. Belousov V.V. Bol'shoj Kavkaz kak tektonicheskaya laboratoriya // Problemy geodinamiki Kavkaza. – М.: Nauka, 1982. S. 9–13.
3. Bogatkov O.A., Gurbanov A.G. Kompleksnye issledovaniya El'brusskogo i Kazbekskogo vulkanicheskikh centrov: monitoring i prognoz // Vestn. Vladikavkazskogo nauchn. centra RAN, 2003. T. 3. № 2. S. 15–28.

4. Bogatkov O.A., Rogozhin E.A., Gurbanov A.G. i dr. Tektonika i geodinamika kontinental'noj litosfery // *Materialy XXXVI Tektonicheskogo soveshchaniya*. T. 1. – M.: GEOS, 2003. S. 48–54.
5. Bol'shoy Kavkaz v al'pijskuyu epohu (red. YU.G. Leonova). – M.: GEOS, 2007. 368 s.
6. Gorbatiykov A.V., Ovsyuchenko A.N., Rogozhin E.A. i dr. Stroenie zony Vladikavkazskogo razloma po rezul'tatam izucheniya kompleksom geologo-geofizicheskikh metodov // *Voprosy inzhenernoj seismologii*, 2010. Tom 37. № 3. S. 36–44.
7. Gurbanov A.G., Katov D.M., Kral' YA. Vyrasenie zony maksimal'nogo proyavleniya kollizii, vyzvannoj stolknovleniem Aravij'skoy i Evrazijskoy plit, v rel'efe Bol'shogo Kavkaza po fishen-trekovym (apatit) i geomorfologicheskim dannym // *Mezhdunar. soveshch. XXIV plenum geomorfol. komissii RAN*. Krasnodar, 6–10 oktyabrya 1998. S. 299–301.
8. Gurbanov A.G., Kral' YA., Gazeev V.M. i dr. Vremya proyavleniya aplifta v razlichnykh strukturno-formacionnykh zonah Severnogo Kavkaza (po dannym fishen-trekovogo analiza apatitov) // *Vestnik VNC RAN*, 2022. T. 22. № 1. S. 55–68.
9. Gamkrelidze I.P., Giorgobiani T.V. Problemy Al'pijskikh deformatsiy Bol'shogo Kavkaza i prilgayushchikh territoriy // *Geologiya i mineral'nye resursy Bol'shogo Kavkaza* (pod red. E.E. Milanovskogo i N.V. Koronovskogo). – M.: Nauka, 1987. S. 35–40.
10. Karta rel'efa podoshvy litosfery SSSR i sopredel'nykh territoriy (pod red. V.V. Solov'yova). – L.: VSEGEI. 1986.
11. Leonov YU.G., Gushchenko O.I., Kopp M.L., Rascvetaev L.M. Vzaimosvyaz' pozdnokajnozoijskikh napryazhenij i deformatsiy v Kavkazskom sektore Al'pijskogo poyasa i v ego severnom platformennom obramlenii // *Geotektonika*, 2001. № 1. S. 36–59.
12. Lilienberg D.A., Kaftan V.I., Kuznecov YU.G., Serebryakova L.I. Kartograficheskie modeli variacij sovremennykh tektonicheskikh dvizhenij morfostruktur Kavkaza i Zakavkaz'ya dlya razlichnykh epoh // *Geomorfologiya*, 1997. № 4. S. 63–75.
13. Lilienberg D.A., Matckova V.A. i dr. Karta sovremennykh vertikal'nykh dvizhenij i morfostrukturnykh Kavkaza // *Problemy sovremennykh dvizhenij zemnoj kory*. – M.: SGK AN SSSR, 1969. S. 142–156.
14. Lilienberg D.A., Yashchenko V.R. Osnovnye tendentsii geodinamiki gornyykh morfostruktur Bol'shogo Kavkaza po novym geodezicheskim dannym // *Geodeziya i kartografiya*, 1991. № 2. S. 21–28.
15. Milanovskiy E.E. Noveyshaya tektonika Kavkaza. – M.: Nedra, 1968. 483 s.
16. Milyukov V. K., Mironov A. P., Rogozhin E. A., Steblov G. M. Ocenki skorostej sovremennykh dvizhenij Severnogo Kavkaza po GPS nablyudeniya // *Geotektonika*, 2015. № 3. S. 56–65.
17. Milyukov V.K., Mironov A.P., Ovsyuchenko A.N., Gorbatiykov A.V., Steblov G.M. i dr. Sovremennyye tektonicheskie dvizheniya Zapadnogo Kavkaza i Predkavkaz'ya po GNSS nablyudeniya // *Geotektonika*, 2022. № 1. S. 51–67.
18. Oveshij i sovremennyy vulkanizm na territorii Rossii (Otv. red. N.P. Laverov). – M.: Nauka, 2005. 604 s.
19. Pavlenkova G.A. Stroenie zemnoj kory Kavkaza po profilam GSZ Stepnoe–Bakuriani i Volgograd–Nahichivan' (rezul'taty pereinterpretatsii pervichnykh dannyyh) // *Fizika Zemli*, 2012. № 5. S. 16–25.
20. Nikolaev P. Metodika tektonodinamicheskogo analiza. – M.: Nedra, 1992. 296 s.
21. Prilepin M.T., Balasanyan S., Baranova i dr. Izuchenie kinematiki kavkazskogo regiona s ispol'zovaniem GPS tekhnologii // *Fizika Zemli*, 1997. № 6. S. 68–75.
22. Prirodnye processy na territorii Kabardino-Balkarii (pod red. N.P. Laverova). – Moskva–Nal'chik: RAN i Min. obrazov. i nauki RF, 2004. 438 s.
23. Rascvetaev L.M., Birman A.S., Kurdin N.N. i dr. Parageneticheskij analiz al'pijskikh diz'yunktivov v rajone Mineral'nykh Vod // *Geologiya i mineral'nye resursy Bol'shogo Kavkaza* (red. E.E. Milanovskogo i N.V. Koronovskogo). – M.: Nauka, 1987. S. 96–106.
24. Rogozhin E.A., Bogachkin B.M. Al'pijskaya i noveshaya tektonika rajona Rachinskogo zemletryaseniya // *Fizika Zemli*, 1993. № 3. S. 3–11.
25. Rogozhin E.A., Sobisevich L.E., Nechaev YU.V. i dr. Geodinamika, seismotektonika i vulkanizm Severnogo Kavkaza. – M.: Region. obshchestv. organizatsiya uchenyyh po probl. prikladn. geofiziki, 2001. 338 s.
26. Rogozhin E.A., Filip E. Geologo-tektonicheskoe izuchenie ochagovoy zony Spitakskogo zemletryaseniya // *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 1991. № 11. S. 3–17.
27. Rogozhin E.A., Gorbatiykov A.V., Zaalishvili V.B., Stepanova M.YU., Zajceva N.V., Harazova YU.V. Novyye dannyye o glubinnom stroenii, tektonike i geodinamike Bol'shogo Kavkaza // *Materialy 46 (XLVI) Tektonicheskogo soveshchaniya «Tektonika skladchatykh poyasov Evrazii: skhodstvo, razlichie, harakternyye cherty noveshego gorobrazovaniya, regional'nye obobshcheniya»*. – M.: GEOS, 2014. S. 125–130.
28. Shevchenko V.I. Proiskhozhdenie struktur gorizontalnogo szhatiya v skladchatom sooruzhenii. – M.: Nauka, 1984. 160 s.
29. Shevchenko V.I., Guseva T.V., Lukk A.A. i dr. Sovremennaya geodinamika Kavkaza (po rezul'tatam GPS-izmereniy i seismicheskim dannym) // *Fizika zemli*. 1999. № 9. S. 3–18.
30. Sholpo V.N., Rogozhin E.A., Goncharov M.A. Skladchatost' Bol'shogo Kavkaza. – M.: Nauka, 1993. 192 s.
31. Becker M., Zebini S., Barker T. et al. Assessment of height variation by GPS at Mediterranean and Black Sea coast tide gauges from the SELF projects // *Global and Planetary Change*, 2002. Vol. 34. Is. 1-2. P. 5–35.
32. Dong D.N., Herring T., King R.W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data // *J. Geod.*, 1998. № 72. P. 200–214.
33. Feigl K.L., Agnew D.C., Bock Y., Dong D.N., Donnellan A., Hager B.H., Herring T.A., Jackson D.D., King R.W., Larsen S.K., Larson K.M., Murray M.H., Shen Z.K. Measurement of the velocity field in central and southern California // *J. Geophys. Res.*, 1993. Vol. 98. P. 21667–21712.
34. Gamkrelidze I.P. Geodynamic evolution of the Caucasus and adjacent areas in Alpine time // *Tectonophysics*, 1986. Vol. 127. P. 261–275.
35. Grun R., Tani A., Gurbanov A. et al. A new method for the estimation of cooling and denudation rates using paramagnetic centers in quartz: A case study on the Eldzhurtinskiy Granite, Caucasus // *J. of Geophys. Res.* 1999. N 104. P. 17531–17549.
36. Herring T.A. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program Version 10.1 Internal Memorandum, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, 2003.

37. Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. *Introduction to GAMIT/GLOBK*. Department of Earth & Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, 2010.
38. Herring T.A. *GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program*. Technical Report. Mass. Inst. of Technology. Cambridge, MA, 1995.
39. King R.W., Bock Y. *Documentation for the GAMIT analysis software, release 9.7*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1998.
40. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. *Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography* // *Solid Earth*, 2012. № 3. P. 327–337.
41. McClusky S., Balasarian S., Barka A. Demitre et al. *Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus* // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. Is. B3. P. 5695–5719.
42. Milykov V., Zharov V. et al. *Monitoring crustal deformations in the Northern Caucasus using precision long base laser strainmeter and the GPS/GLONASS net work* // *J. Geod.* 2010. № 49. P. 216–223.
43. Milykov V.K., Yushkin V.D., Kopaev A. et al. *Monitoring current vertical movement of the Northern Caucasus by Absolute and Gravimetry* // *Measurement techniques*, 2014. Vol. 56. Is. 10. P. 1105–1110.
44. Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A. *The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision* // *Tectonophysics*, 1989. V. 161. P. 1–21.
45. Reilinger R., McClusky S., Souter B. et al. *Preliminary estimates of plate convergence in the Caucasus collision zone from global positioning system measurements* // *Geophys. Res. Lett.* 1997. Vol. 24. № 14. P. 1815–1818.
46. Reilinger R., McClusky S., Verrvant P. et al. *GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interaction* // *J. Geophys. Res.* 2006. vol. 111. Is. B0 5411.
47. Rogozhin E.A., Gurbanov A.G., Marakhanov A.V. et al. *Ancient earthquake dislocations in the area of Elbrus Volcano, North Caucasus* // *Russian Jour. Earth Sci.* 2004. V. 6. N 4. P. 1–22.
48. Thatcher W. *GPS constraints on the kinematics of continental deformation* // *International Geology Review*, 2003. Vol. 45. P. 191–212.

