ISSN 2541-8912 (Print) ISSN 2713-2161 (Online)

ГЕРЕХОДНЫХ ЗОН



GEOSYSTEMS of Transition Zones 2024 TOM 8 № 4

Решением Научно-экспертного совета Морской коллегии при Правительстве Российской Федерации доктор геолого-минералогических наук, доцент, член редколлегии нашего журнала, Ренат Белалович Шакиров награжден медалью «За достижения в морской науке».

Редколлегия и редакция журнала «Геосистемы переходных зон» поздравляют Рената Белаловича и его коллектив с этой неординарной наградой и желают ему дальнейших успехов в морских научных исследованиях и экспертной работе на международных площадках.



© Авторы, 2024 г. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2024. Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 528:629.783+551.24

https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.4.298-312 https://www.elibrary.ru/gutfzv

Тектонические движения и деформации в пределах Бишкекской локальной GPS-сети (Северный Тянь-Шань) по данным многолетних космогеодезических наблюдений

С. И. Кузиков[®], О. А. Прохоров [®]E-mail: ksi@gdirc.ru Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия

Резюме. Проведено исследование поля скорости современных движений земной коры в пределах Бишкекской локальной сети (Северный Тянь-Шань) за 1997–2021 гг. повторных космогеодезических измерений. Показано закономерное уменьшение северной компоненты скорости от южного блока палеозойских пород на северном склоне Киргизского хребта, через срединный блок кайнозойских образований и до северного блока четвертичных отложений в Чуйской долине. На основе векторов скорости построены поля разных видов скорости деформации, которые свидетельствуют о концентрации повышенных значений деформации до 1.4·10⁻⁷/год в пределах срединного кайнозойского блока. Причем высокий уровень скорости деформаций не концентрируется в разломных зонах и рассредоточен по площади кайнозойского тектонического блока, который находится в области сочленения северных отрогов Киргизского хребта и Чуйской депрессии.

Ключевые слова: Северный Тянь-Шань, ГНСС-измерения, современные движения, деформации, геологическая структура

Tectonic movements and deformations within the Bishkek local GPS network (Northern Tien Shan) based on long-term space geodetic observations

Sergey I. Kuzikov[®], Oleg A. Prokhorov [®]E-mail: ksi@gdirc.ru Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Bishkek city, Kyrgyzstan

Abstract. The velocity field of modern crustal movements within the Bishkek local GPS network (the Northern Tien Shan) was studied for the years 1997–2021 of repeated space geodetic measurements. A regular decrease in the northern velocity component was shown from the southern block of Paleozoic rocks on the northern slope of the Kyrgyz Ala-Too Range through the middle block of Cenozoic formations and to the northern block of Quaternary deposits in the Chu Valley. Based on the velocity vectors, fields of different types of strain rates were constructed, which indicate a concentration of increased strain values up to 1.4·10⁻⁷/year within the middle Cenozoic block. Moreover, the high strain rate is not concentrated in fault zones and is dispersed over the area of the Cenozoic tectonic block, which is located at the junction of the northern spurs of the Kyrgyz Range and the Chu depression.

Keywords: Northern Tien Shan, GNSS measurements, modern movements, deformations, geological structure

Для цитирования: Кузиков С.И., Прохоров О.А. Тектонические движения и деформации в пределах Бишкекской локальной GPS-сети (Северный Тянь-Шань) по данным многолетних космогеодезических наблюдений. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 4, с. 298–312. https://doi. org/10.30730/gtrz.2024.8.4.298-312; https://www.elibrary.ru/gutfzv *For citation:* Kuzikov S.I., Prokhorov O.A. Tectonic movements and deformations within the Bishkek local GPS network (Northern Tien Shan) based on long-term space geodetic observations. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, No. 4, pp. 298–312. (In Russ., abstr. in Engl.). https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.4.298-312; https://www.elibrary.ru/gutfzv

Финансирование

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Научной станции РАН в г. Бишкеке (№ 1021052806451-5-1.5.1).

Введение

Причины глобальных тектонических деформаций Азиатского континента исследователи связывают с длительной (десятки миллионов лет) историей дрейфа Индийской плиты на север и ее столкновением с Азиатским материком [1]. Развитие методов высокоточного GPS (Global Positioning System) позиционирования позволило создать Центрально-Азиатскую сеть наблюдений за современными

движениями земной коры с охватом Тянь-Шаня и прилегающих территорий. Эти работы выполнялись большой международной группой ученых на базе Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (НС РАН). По результатам этих GPSизмерений, скорость сокращения земной коры на Тянь-Шане составила ~20 мм/год с юга на север. Это дало основание оценить здесь ширину зоны смятия и сокращения земной коры на ~200 км [2, 3]. Но эта зона составляет лишь небольшую часть от общей зоны деформации между Индией и Азией шириной 2000-3000 км, в которой расположены горные массивы Гималаев, Гиндукуша, Тибета, Куньлуня, Памира, Тянь-Шаня и др. [4]. В наши дни между северными равнинными окраинами Индийского континента и южными частями Казахской платформы продолжается меридиональное сокращение пространства со скоростью ~3.5 см/год [5], которое сопровождается современными процессами складчатости и разрывов в литосфере (рис. 1).

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Research Station of the RAS in Bishkek (No. 1021052806451-5-1.5.1).

При детальном исследовании процесса коллизии Индийской и Азиатской плит возникает вопрос о современном характере распределения интенсивности движений и деформаций в зоне горного пояса между двумя континентами. По одному варианту представлений, в зоне коллизии основные смещения реализуются по разрывам между блоками. При этом блоки разных размеров деформируются минимально и выжимаются (перемещаются)



Рис. 1. Горизонтальная скорость движения северной части Индийской плиты относительно наблюдателя, расположенного в южной части Азиатского континента (ромбик), на основе GPS-измерений за 2007–2015 гг. (по [4, 5]). Прямоугольник – Бишкекская локальная GPS-сеть.

Fig. 1. Horizontal movement velocity of the northern part of Indian Plate relative to an observer located in the southern part of Asia (diamond) based on GPS measurements for 2007–2015 according to [4, 5]. Rectangle denotes Bishkek local GPS network.

в направлениях восток-запад, чем объясняется общее меридиональное укорочение земной коры [6]. Другое представление опирается на минимальные смещения по разломам и на максимальное распределение деформации по объему блоков, в результате чего мы наблюдаем укорочение в направлении север-юг и утолщение литосферы по глубине [7].

При исследовании характера движений по данным о скорости >300 пунктов Центрально-Азиатской GPS-сети за 1995-2005 гг. наблюдений были выделены квазижесткие домены на территории Тянь-Шаня и Казахского Щита [8]. При этом в поле скоростей выделено до 30 разных по размеру жестких доменов, содержащих от 3 до 17 векторов скорости, отклоняющихся от критерия жесткости не более 1.0 мм/год. Эти домены и пространства между ними не имеют четкой привязки к геологическим блокам и кайнозойским разломам. Но междоменные зоны характеризуются повышенными скоростями смещений и статистически имеют такие же направления простирания, как и поздние разломы земной коры в этом регионе. Причем совпадают не только 4 основные направления простираний, но и направления смещений по отношению к этим простираниям. Таким образом, наиболее поздняя геологическая структура блоков и разломов как бы застыла по отношению к структуре современных движений земной коры Центральной Азии. Но при этом характер деформирования продолжает сохраняться на современном этапе, т.е. с течением времени продолжает действовать один и тот же фактор воздействия на земную кору в этом регионе.

Помимо региональных площадных повторных космогеодезических измерений НС РАН уже более 25 лет проводит регулярные наблюдения в пределах Бишкекской локальной GPS-сети (БЛГС). В этом случае интерес представляет сравнение современных движений и деформаций земной коры с геологической структурой на локальном уровне.

Сеть, методика GPS-измерений и обработки данных

В границах Центрально-Азиатской GPSсети (60–90° E, 35–55° N), в районе столицы Киргизии г. Бишкек и его пригородов, располагается БЛГС. На пунктах этой сети начиная с 1997 г. 4 раза в год проводятся GPSизмерения, на основе которых изучаются современные движения земной коры в пределах самой густонаселенной территории Киргизской Республики.

Сначала здесь были установлены первые 25 пунктов эпизодических GPS-измерений, с 2000 по 2002 г. в ее состав было включено еще 22 пункта. Но с течением времени часть пунктов космогеодезических наблюдений была уничтожена или прекращены измерения на них по причинам невозможности круглогодичного подъезда к ним. За последние годы регулярно измеряются 36 точек, которые по сети триангуляции удалены друг от друга в среднем на ~9 км, при максимальном удалении до ~19 км (рис. 2).

Места установки пунктов космогеодезических измерений региональной Центрально-Азиатской сети и БЛГС выбирались таким образом, чтобы исключить влияние экзогенных факторов на движение этих пунктов. Таким образом, нас интересует оценка современных движений только сравнительно больших блоков земной коры, в зависимости от масштаба организуемой сети наблюдения. Практически на каждом таком пункте устанавливается 2-3 марки на скальных обнажениях пород или на железобетонном фундаменте в слабосцементированных породах кайнозойского возраста. Распределение пунктов по сети измерения планировалось по возможности равномерным, с учетом структурно-геологической ситуации. При этом учитывалось наличие круглый год подъездных дорог и максимально открытого неба, отсутствие рядом объектов, способных вносить переотражение и искажение спутникового навигационного сигнала [9].

За последние 20 лет наблюдений на БЛГС ежегодно проводятся 4 цикла GPS-опроса всех пунктов этой сети. Продолжительность измерительной сессии на каждом пункте составляет не менее 36 ч, частота записи данных от созвездия навигационных спутников составляет стандартные 30 с. Для измерений использовались приемники Торсоп Legacy-E, способные фиксировать сигналы GPS и ГЛОНАСС. Но программное обеспечение приемника Торсоп Legacy-Е не позволяло вести запись данных со всех спутников ГЛОНАСС, поэтому основной навигационной системой была GPS [9]. Полученные данные размещаются в структурированном цифровом архиве, верифицируются и подготавливаются для дальнейшей обработки. Вся необходимая для обработки и анализа информация об измерениях пунктов БЛГС размещена в электронной базе метаданных.

Для получения высокоточных временных рядов координат и векторов скорости нами уже около 30 лет используется программный комплекс GAMIT/GLOBK [10]. Это одна из самых первых и передовых программ расчета высокоточных позиций и векторов скорости для целей геодинамического исследования. Программный комплекс GAMIT/GLOBK постоянно совершенствуется авторами из Массачусетского технологического института. Эта программа достаточно сложная и имеет многоэтапную обработку входных данных от Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), но при соблюдении всех необходимых требований можно добиться точности расчета координат пункта до 1-2 мм [9, 11].

После сложного процесса обработки данных GPS-измерений за 1997–2021 гг. для пунктов БЛГС в системе отсчета EURA2014 были получены временные ряды координат и векторы скорости. Временные ряды координат пункта могут содержать отдельные определения его позиции с явными отклонениями от многолетнего тренда движения этого пункта. В таких случаях будут происходить искажения значений вектора скорости исследуемого пункта. Поэтому для всех полученных нами временных рядов координат для пунктов наблюдения проведены анализ и очистка от статистически значимых отклонений позиции от линейного тренда.



Рис. 2. Расположение пунктов Бишкекской локальной GPS-сети в районе сочленения склонов Киргизского хребта и Чуйской впадины, недалеко от г. Бишкек. Эпизодические измерения на GPS-пунктах ведутся с 1997 г.
Fig. 2. The location of the Bishkek local GPS network sites at the junction of the slopes of the Kyrgyz Ala-Too Range and the Chu Valley near Bishkek city. Episodic measurements at GPS sites have been conducted since 1997.

Геологическая структура района исследований

Основная задача этой работы заключается в попытке оценить современный характер распределения движений и деформаций на территории БЛГС, где в течение более 20 лет проводятся регулярные эпизодические GPS-наблюдения на пунктах со средним удалением друг от друга до 10 км. При этом представляет интерес распределение современных деформаций относительно основных геологических структур, сформированных за миллионы или тысячи лет до космогеодезических измерений. С учетом указанных задач и приоритетов, условий и размера территории Бишкекской локальной сети, а также наличия доступных картографических материалов, наиболее подходящей является Геологическая карта Киргизской Республики масштаба 1:500 000, 2008 г. (http://neotec.ginras.ru/ neomaps/M005_Kyrgyzstan_2008_Geology.jpg). Фрагмент этой карты в рамках границ БЛГС показан на рис. 3.

Учитывая площадной охват территории исследования, неравномерное распределение пунктов GPS-измерения и структурно-геологические условия, можно выделить 3 блока для исследования (рис. 3). Здесь блок Q представляет собой разрез от среднечетвертичных до голоценовых речных отложений Чуйской долины с высотами 500–900 м н.у.м. С юга по Иссык-Атинскому разлому (IA) на блок Q надвинут блок KZ с превышением ближайших вершин холмов до 1000 м над долинными отложениями Q. В поле KZ преобладают отложения с возрастным диапазоном от позднего палеогена до



Рис. 3. Фрагмент Геологической карты Киргизской Республики масштаба 1:500 000, 2008 г. Треугольники – пункты GPSизмерений. Здесь и на рис. 4, 6–9: IA – структурная линия, совпадающая с Иссык-Атинским взбросом и разделяющая блок преимущественного развития четвертичных отложений (Q) и блок развития кайнозойских пород (KZ). SH – структурная линия, в значительной мере совпадающая с простиранием Шамсинского взброса и разделяющая блок развития кайнозойских пород (KZ) и блок палеозойских пород (PZ).

Fig. 3. Fragment of the Geological Map of the Kyrgyz Republic, scale 1:500,000, 2008. Triangles indicate GPS measurement sites. Here and on the Figures 4, 6–9: IA denotes a structural line that coincides with the Issyk-Ata reverse fault and separates the block of predominant development of Quaternary deposits (Q) from the block of development of Cenozoic rocks (KZ). SH indicates a structural line that largely coincides with the Shamsinsky reverse fault and separates the block of development of Cenozoic rocks (KZ) from the block of Paleozoic rocks (PZ).

ранних четвертичных образований. Верхний высотный предел КZ-блока до 2000 м н.у.м. Далее с юга на КZ-блок взброшен блок РZ по системе разрывных нарушений, в восточной половине эта структура совпадает с Шамсинским взбросом (SH). Блок РZ представлен скальными выходами пород осадочного и магматического генезиса и ордовик-силурийского возраста. Породы РZ-блока встречаются на высотах от 1600 м на отрогах и до 4800 м н.у.м. на водоразделе Киргизского хребта.

При такой достаточно обобщенной схеме геолого-тектонического строения территории локальных пунктов GPS-наблюдений возникает вопрос – в каких участках концентрируются движения и деформации? Распределены ли движения земной коры равномерно по площади всей этой территории, по отдельным блокам или сконцентрированы в зонах разрывов земной коры?

Результаты анализа векторного поля скоростей и тектонической структуры

В системе отсчета EURA2014 горизонтальные векторы скорости для пунктов БЛГС за 1997–2021 гг. представлены на рис. 4.

Чтобы иметь представление о характере повторяемости при определении горизонтальных позиций и о достоверности расчета векторов скорости для пунктов БЛГС, приведем графики временных рядов исследуемых координат для пункта IV08, расположенного в срединной части сети наблюдения (рис. 5).

Для анализа группы векторов скорости важно знать их систему отсчета и временной интервал наблюдений [8, 9]. Ранее в пределах этих же блоков проводилось сравнение статистических параметров распределения векторов скорости, но за 1997–2014 гг., с мень-



Рис. 4. Горизонтальные векторы скорости в системе отсчета EURA2014 с кодовыми названиями GPS-пунктов сети за 1997–2021 гг., с оценками ошибок до 1 (в среднем 0.4) мм/год. Q_{avr} , KZ_{avr} , PZ_{avr} – средние векторы скорости для соответствующих блоков преимущественного развития разновозрастных пород.

Fig. 4. Horizontal velocity vectors in the EURA2014 reference frame with code names of GPS network sites for 1997–2021 with error estimates of up to 1 (average 0.4) mm/year. Q_{avr} , KZ_{avr} , and PZ_{avr} indicate mean velocity vectors for the corresponding blocks of predominant development of different age rocks.



Рис. 5. Временные ряды горизонтальных топоцентрических координат и соответствующие им компоненты скорости (N – северная, Е – восточная) в системе отсчета EURA2014 для пункта IV08 за 1997–2021 гг.

Fig. 5. Time series of horizontal topocentric coordinates and the corresponding velocity components (N, north; E, east) in the EURA2014 reference frame for the site IV08 for 1997–2021.

шим числом векторов и при системе отсчета EURA2008 [5]. Таким образом, на текущий момент добавлены данные еще за 7 лет наблюдений на территории БЛГС и сменилась система отсчета при расчете векторов скорости.

Статистические параметры для векторов скорости по разным блокам и разным интер-

валам наблюдений сведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 следует, что уровни значений по компонентам скорости (Е – восточная, N – северная) за 1997-2021 гг. при EURA2014 в среднем выше по модулю на 0.9 мм/год более ранних расчетов 1997-2014 ГГ. за при EURA2008 [5]. Но относительные превышения средних скоростей от блока к блоку примерно одинаковы для двух вариантов расчетов. Это сравнение свидетельствует о качестве измерений, точности расчетов и устойчивости векторов скорости с течением времени.

В конечном счете нас интересует последний наиболее полный вариант (1997–2021 гг., EURA2014)

статистических параметров для векторов скорости по разным блокам исследуемой территории. В этом случае восточная компонента для средних значений скорости по блокам Q, KZ и PZ (рис. 4 и табл. 1) изменяется незначительно (-1.00, -0.99 и -0.89). Но при этом увеличиваются значения западного направления от

Таблица 1. Статистические характеристики для наборов горизонтальных векторов скорости (мм/год) в пределах всей Бишкекской локальной сети (*n* – количество пунктов) и отдельных ее блоков в разные интервалы наблюдения, с разными системами отсчета

Table 1. Statistical characteristics for the sets of horizontal velocity vectors (mm/year) within the entire Bishkek local GPS network and its individual blocks (*n*, number of sites) at different observation intervals with different reference frames

Территория, блок		1997–2014 гг.,	EURA2008 [5	5]	1997–2021 гг., EURA2014					
	п	Min	Avr	Max	п	Min	Avr	Max		
БЛГС	31 31	-2.39 0.02	-0.86 1.50	-0.17 2.73	36 36	$-2.89 \\ 0.89$	-0.97 2.34	-0.24 3.47		
Q	10 10	-2.39 0.02	$\begin{array}{c} -1.00\\ 0.67\end{array}$	-0.17 1.93	11 11	$-2.89 \\ 0.89$	$\begin{array}{c} -1.00\\ 1.56\end{array}$	-0.24 2.91		
KZ	12 12	$-1.17 \\ 1.15$	-0.80 1.64	$\begin{array}{c} -0.40\\ 2.16\end{array}$	16 16	-1.24 2.02	-0.99 2.44	-0.53 2.94		
PZ	9 9	$\begin{array}{c} -1.18\\ 1.78\end{array}$	-0.79 2.23	-0.35 2.73	9 9	-1.17 2.72	-0.89 3.12	$-0.65 \\ 3.47$		

Примечание. В верхней строке восточная компонента скорости (E), в нижней – северная (N). *Note.* The top line is the eastern velocity component (E), the bottom line is northern component (N).

PZ-блока к блоку Q. Северная компонента для средних значений скорости по блокам Q, KZ и PZ меняется более заметно (1.56, 2.44, 3.12) с уменьшением с юга на север.

Из вышеприведенных данных следует, что от южного PZ-блока к северному Q, на каждой из двух разрывных границ или внутри блока теряется ~0.8 мм/год в значениях северной компоненты скорости. Это может быть объяснено взбросовыми смещениями по разломам долготного простирания (запад-восток). И если учитывать изменения по средним значениям восточной компоненты скорости, то к взбросовому характеру движений на разломах может быть добавлен и левосторонний сдвиг.

Методика и результаты деформационного анализа на основе векторов скорости

Следует отметить, что вертикальная компонента скорости для пунктов БЛГС в настоящее время имеет оценку точности до 2 мм/год, что в 2 раза хуже точности определения горизонтальных компонент скорости. Кроме того, доступные нам алгоритмы расчета скорости деформации не предусматривают использование вертикальной компоненты. Авторская же версия программы 3-мерных расчетов деформации находится на стадии разработки.

В этой работе использована методика расчета скорости деформации по З.К. Шену [12], которая основана на подборке тензора горизонтальной деформации, где модельные и наблюденные векторы максимально должны совпадать друг с другом. Для произвольного узла сетки (x, y) находятся компоненты горизонтальной скорости (u_{v}, u_{v}) , компоненты тензора скорости деформации (τ_{xx} , τ_{yy} , τ_{yy}) и скорость вращения (ω). Такие параметры каждого узла сетки будут зависеть от расположения учитываемых пунктов GPS-наблюдения (X_i , Y_i , i = 1, 2, ..., *n*), от их скорости и ошибок ($U_{xi} \pm \varepsilon_{xi}$, $U_{vi} \pm \varepsilon_{vi}$) и от приращений координат от рассчитываемого узла сетки до GPS-станций $(\Delta_{xi} = x - X_i, \Delta_{yi} = y - Y_i)$. Узлы сетки строятся с выбранным шагом по осям координат.

Критерий L_i контролирует влияние каждого GPS-пункта на тензор деформации в узле расчета. Если необходимо получить более высокое разрешение результата интерполяции, то параметр L_i строится на основе функции Гаусса для взвешивания скорости этого пункта наблюдения. В том случае, если скорости достаточно неоднородны или редки, L_i рассчитывается на квадратичной функции для обеспечения более сглаженного деформационного решения. Также в этой методике расчета тензора деформации используется параметр сглаживания D, который для каждого узла подбирается индивидуально на основе суммы весовых коэффициентов, при этом часть граничных параметров задается пользователем.

Для исключения отрицательного влияния острых угловых секторов при неравномерно распределенных пунктах наблюдения вблизи текущего узла осуществляется дополнительный расчет азимутальной весовой функции (Z_i) . В этом случае учитывается равномерность распределения и влияние ближайших пунктов наблюдения не только по дальности, но и по азимутальному кругу [13].

С учетом вышеизложенного подходим к расчету собственно деформационных параметров. На основе горизонтальных компонент тензора (τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yy}) рассчитываются главные оси (ε_{max} , ε_{min}) скорости деформации [14]. Далее приступаем к вычислению максимальной скорости сдвига (τ_{max}), скорости дилатансии (*dilat*) и второго инварианта (*secinv*) тензора скорости деформации [15].

На основе данных 36 векторов скорости для БЛГС за 1997-2021 гг. по вышеописанной методике были рассчитаны деформационные параметры. Для получения сглаженной и в то же время достаточно детальной картины горизонтальной деформации алгоритм выбрал весовой коэффициент сглаживания D ≤ 20 км. Это значит, что от узла расчета деформации учитывались векторы скорости не дальше 20 км, и чем дальше пункт GPSнаблюдения - тем меньше его вес влияния на деформацию узла [13]. Расчет разных видов деформации осуществлялся в узлах равномерной сетки с шагом 0.04° по направлениям север-юг (~4.45 км) и запад-восток (~3.26 км) внутри территории, ограниченной пунктами GPS-наблюдений. На рис. 6 для территории БЛГС в 126 узлах расчета показаны главные оси горизонтальной скорости деформации.

При общем рассмотрении всех узлов на рис. 6 выделяется наиболее значимый фактор - это околомеридиональное направление деформационных осей скорости укорочения и, соответственно, запад-восточная ориентация осей скорости преимущественного удлинения. При этом субдолготные оси имеют максимальные значения за счет преобладающих положительных значений деформации (удлинения, ε_{*max*}). Вдоль субмеридиональных направлений располагаются оси минимальных отрицательных значений (укорочения, є_{тіп}), которые более чем на порядок превышают по модулю значения є так. Полученные в этом разделе деформационные параметры за 1997-2021 гг. в общих чертах согласуются с результатами расчетов за меньшие интервалы наблюдений, на 5-15 лет, в более ранних работах [16, 17].

В центральной части БЛГС, в блоке КZотложений, отмечается аномальный поворот оси скорости укорочения на С-СВ (или Ю-ЮЗ). Также здесь визуально отмечается тенденция уменьшения абсолютных значений ε_{min} и увеличение по модулю значений ε_{max} с юга на север, от блока палеозойских образований (РZ) к блоку четвертичных отложений (Q). Причем в самых северных узлах расчета деформаций значения ε_{max} по модулю почти достигают уровня абсолютных значений ε_{min} . Более детальные статистические параметры по главным осям горизонтальной скорости деформации для всех узлов в пределах всей локальной сети и по отдельным блокам и зонам сведены в табл. 2.

Минимальные (min), средние (avr) и максимальные (max) значения по главным осям скорости горизонтальной деформации в табл. 2 в общих чертах подтверждают визуальное восприятие рис. 6. Особенностью здесь являются более высокие значения скорости



Рис. 6. Главные оси горизонтальной скорости деформации в узлах сетки через 0.04°, рассчитанные по векторам скорости для пунктов БЛГС (желтые кружки) за 1997–2021 гг.

Fig. 6. Principal axes of horizontal strain rate at 0.04° grid nodes calculated from velocity vectors for the Bishkek local GPS network sites (yellow circles) for 1997–2021.

Таблица 2. Статистические	характеристики по	о главным	осям	горизонтальной	скорости	деформации	для	узлов
в пределах БЛГС, отдельных	блоков и зон							

Table 2. Statistical	characteristics for	the principa	l axes of l	horizontal	strain ra	ate for 1	nodes	within t	the	Bishkek	local	GPS
network, individual	blocks, and zones											

Блок,	Число	٤,	$_{max}$, ×10 ⁻⁹ / $_{\Gamma C}$	од	3	_{min} , ×10 ⁻⁹ /ΓC	од	A	азимут е _{тіп} ,	0
зона	узлов	Min	Avr	Max	Min	Avr	Max	Min	Avr	Max
БЛГС	126	-35.9	5.7	32.4	-140.4	-82.4	-40.0	162.1	178.4	196.5
Q	43	-35.9	11.5	32.4	-105.9	-66.2	-40.0	162.1	173.2	196.5
IA	34	-35.9	2.8	17.9	-135.5	-90.7	-60.8	163.7	179.7	196.5
KZ	48	-26.8	2.8	17.9	-140.4	-97.2	-62.1	168.0	181.9	196.1
SH	40	-16.7	2.4	17.0	-140.4	-91.1	-62.1	175.5	182.0	193.1
PZ	35	-1.6	2.5	7.0	-102.2	-82.1	-63.9	174.7	180.1	189.0

субмеридионального укорочения в кайнозойском блоке (KZ) относительно других выделенных участков БЛГС. Причем даже обрамляющие KZ-блок зоны разрывных нарушений (IA и SH) имеют меньший уровень скорости укорочения. Это значит, что повышенные скорости укорочения не сосредоточены только в пограничных взбросовых зонах Иссык-Атинского и Шамсинского разломов, а в большей мере распределены по всему блоку КZ. Что может свидетельствовать о возможности реализации по всему КZблоку пластической деформации (или смятия).

Рассмотрим сдвиговую форму скорости деформации в пределах БЛГС (рис. 7).

При общем охвате данных о скорости деформации сдвига на рис. 7 выделяется область повышенных значений, в границах КZ-блока и в пределах 74.5–75.3° Е. Сразу за границами



Рис. 7. Значения скорости горизонтальной деформации сдвига в узлах сетки (0.04°), рассчитанные по векторам скорости БЛГС (желтые кружки) за 1997–2021 гг.

Fig. 7. Horizontal shear strain rate values at grid nodes (0.04°) calculated from velocity vectors of the Bishkek local GPS network (yellow circles) for 1997–2021.

Таблица 3.	. Статистические	характеристики	для скорости	горизонтальной	деформации	сдвига и	дилатансии,	BTO-
рого инвари	ианта, ×10 ⁻⁹ /год		-	-				

Блок,	Число	Сдвиг			Дилатансия			Второй инвариант		
зона уз	узлов	Min	Avr	Max	Min	Avr	Max	Min	Avr	Max
БЛГС	126	21.0	44.1	73.4	-157.1	-76.7	-7.9	51.2	83.5	141.4
Q	43	21.0	38.9	59.8	-113.8	-54.6	-7.9	51.2	68.8	106.8
IA	34	21.0	46.8	73.4	-148.0	-88.0	-53.2	61.1	91.9	136.0
KZ	48	30.8	50.0	73.4	-157.1	-94.5	-61.8	62.1	97.6	141.4
SH	40	30.8	46.7	62.2	-157.1	-88.7	-62.6	62.1	91.3	141.4
PZ	35	31.1	42.3	53.0	-98.4	-79.6	-62.7	63.9	82.2	102.3

Table 3. Statistical characteristics for horizontal shear and dilatation strain rate, second invariant, 10^{-9} /year

указанной территории уровень значений скорости сдвига заметно уменьшается. Очевидно, что повышенные скорости деформации не приурочены к узким линиям разрыва земной коры, а рассредоточены по центральной и восточной площади КZ-блока.

Статистические характеристики распределения скорости деформации сдвига по блокам и зонам БЛГС сведены в табл. 3. Самые минимальные значения скорости сдвига лежат в поле развития Q, несколько более высокие средние параметры сдвига характерны для PZблока. Еще более высокие параметры скорости сдвига имеют разломные зоны IA и SH, но все эти площади уступают по уровню статистических характеристик KZ-блоку (табл. 3).

Рассмотрим скорость объемной деформации или дилатансии в горизонтальном плане (рис. 8).



Рис. 8. Значения скорости горизонтальной дилатансии (деформации площади по сетке 0.04°) на основе векторов скорости БЛГС за 1997–2021 гг.

Fig. 8. Horizontal dilatation rate values (area deformation by grid 0.04°) based on velocity vectors of the Bishkek local GPS network for 1997–2021.

Первое, что обращает на себя внимание на рис. 8, это полностью отрицательное поле значений для скорости горизонтальной дилатансии. Это значит, что на всей исследуемой территории наблюдается сокращение площади. Максимальные по модулю значения скорости дилатансии также лежат в пределах KZблока, особенно выделяется его центральная часть между 74.6-75.0° Е. Из табл. 3 следует, что самые минимальные по модулю средние значения скорости дилатансии лежат в блоке Q, более высокие средние параметры изменения площади имеет блок РZ. Зоны разломов IA и SH имеют примерно равный уровень дилатансии, который больше значений в РZ-блоке. Больше всех уровень площадной деформации в KZ-блоке.

Еще одним видом скорости горизонтальной деформации по методике З.К. Шена [12, 13] является так называемый второй инвариант тензора деформации. Этот параметр может характеризовать скорость общих линейных и угловых деформаций (рис. 9; табл. 3).

На рис. 9 распределение скорости общей деформации имеет аналогичную структуру по отношению к другим видам скорости деформации (рис. 7 и 8). Здесь скорость общей деформации больше 100 × 10⁻⁹/год сосредоточена восточнее 74.6° Е только в КZ-блоке, за исключением 2 приграничных узлов (рис. 9). Максимальные значения второго инварианта тензора скорости деформации достигают (120-141) × 10-9/год и располагаются в самом центре КZ-блока между 74.8-75.0° Е. Согласно табл. 3, ограничивающие КZ-блок разломные зоны IA и SH имеют примерно одинаковые (91.9 и 91.3) средние значения общей скорости деформации, которые уступают среднему значению КZ-блока – 97.6 (×10⁻⁹/год). Периферийный с юга РZ-блок имеет среднюю скорость общей деформации 82.2, а северный Q-блок - самое низкое значение этого параметра 68.8 (×10⁻⁹/год).



Рис. 9. Второй инвариант тензора скорости горизонтальной деформации (по сетке 0.04°) на основе векторов скорости БЛГС за 1997–2021 гг.

Fig. 9. The second invariant of the horizontal strain rate tensor $(0.04^{\circ} \text{ grid})$ based on velocity vectors of the Bishkek local GPS network for 1997–2021.

Заключение

По данным как минимум 72 циклов эпизодических измерений за 1997-2021 гг. наблюдений, на 36 пунктах Бишкекской локальной GPS-сети посредством программы GAMIT/GLOBK рассчитаны горизонтальные векторы скорости в системе отсчета EURA2014 с ошибками до 1 мм/год. Такая система векторов скорости позволила провести оценку распределения современных кинематических и деформационных параметров по отношению к обобщенной геологической структуре этого района. На территории БЛГС выделяется 3 блока с преимущественным развитием четвертичных Q, кайнозойских KZ и палеозойских PZ пород. Эти блоки разделяются обобщенными линиями разрывного взбросового происхождения и субдолготного простирания.

В системе отсчета EURA2014 восточная компонента скорости от южного РZ-блока, через средний КZ-блок, к северному Q-блоку меняется в среднем незначительно: от -0.9 до -1.0 мм/год. При субдолготной протяженности линий разрыва это может обеспечивать им небольшой левосторонний сдвиг. При этом северная компонента для средних скоростей от РZ к Q блоку меняется с 3.1 до 1.6 мм/год, уменьшаясь примерно в равных долях от одного блока к другому. Это может интерпретироваться как реализация взбросов по граничным линиям между блоками или как равномерное распределение уменьшения северной компоненты скорости с юга на север по всему объему пород. Что может свидетельствовать о надвигании пород Киргизского хребта на Чуйскую депрессию.

На основе вышеописанных векторов скорости в пределах БЛГС по методу З.К. Шена рассчитаны параметры тензора горизонтальной деформации. Это параметры скорости деформации по главным осям, сдвигу, дилатансии и второму инварианту тензора.

На всей территории БЛГС ось скорости укорочения направлена в субмеридиональном направлении, (-40... -140) × 10⁻⁹/год, а ось скорости удлинения – в субдолготном направлении, (-35... +32) × 10⁻⁹/год. При-

чем абсолютные значения по оси укорочения в среднем на порядок превышают абсолютные показатели удлинения. С юга на север значения скорости удлинения имеют тенденцию увеличиваться.

Скорость деформации максимального сдвига варьирует здесь в пределах (21–73) × 10⁻⁹/год. Скорость дилатансии на всей исследуемой территории имеет отрицательные значения (-8... -157) × 10⁻⁹/год. Это свидетельствует о всеобщем сокращении площади всех блоков. Скорость общей деформации (второй инвариант тензора) изменяется в пределах (51–141) × 10⁻⁹/год.

Общей закономерностью для всех видов скорости деформации являются повышенные показатели в КZ-блоке, особенно высокий уровень значений отмечается восточнее 74.6° Е. Граничные с кайнозойским блоком разломные зоны имеют меньшие деформационные показатели, еще меньший уровень скорости деформации присущ блоку палеозойских пород, а поле четвертичных отложений имеет самый низкий уровень по всем видам скорости деформации.

Список литературы

- 1. Molnar P., Tapponnier P. **1975.** Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, 189(4201): 419–426.
- Abdrakhmatov K.Ye., Aldazhanov S.A., Hager B.H., Hamburger M.W., Herring T.A., Kalabaevll K.B., Makarov V.I., Molnar P., Panasyuk S.V., Prilepin M.T. et al. **1996.** Relatively construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. *Letters to Nature*, 384: 450–453.
- Zubovich A.V., Wang X.-Q., Scherba Y.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O.I., Molnar P., Michajljow W., Makarov V.I., et al. 2010. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions. *Tectonics*, 29(TC6014). https://doi. org/10.1029/2010TC002772
- Ischuk A., Bendick R., Rybin A., Molnar P., Khan S., Kuzikov S., Mohadjer S., Saydullaev U., Ilyasova Z., Schelochkov G. et al. 2013. Kinematics of the Pamir and Hindu Kush regions from GPS geodesy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118: 2408–2416. https://doi.org/10.1002/jgrb.50185
- 5. Kuzikov S.I. **2019.** The ratio of tectonic structure and modern movements of the crust in area of geodynamic proving ground in Bishkek. *IOP Conference Se*-

ries: Earth and Environmental Science, 324(012011). https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012011

- Replumaz A., Tapponnier P. 2003. Reconstruction of the deformed collision zone between India and Asia by backward motion of lithospheric blocks. *Journal of Geophysical Research*, 108(2285). https://doi. org/10.1029/2001JB000661
- 7. Flesch L.M., Haines A.J., Holt W.E. **2001.** Dynamics of the India-Eurasia collision zone. *Journal of Geophysical Research*, 106: 16435–16460.
- Кузиков С.И., Мухамедиев Ш.А. 2010. Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS сети. Физика Земли, 7: 33–51.
- Кузиков С.И. 2014. Методические задачи и проблемы точности GPS-наблюдений (на примере Бишкекского геодинамического полигона). Физика Земли, 6: 55–69. https://doi.org/10.7868/ S0002333714060039
- Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C. 2010. Introduction to GAMIT/GLOBK: Release 10.7. Massachusetts Institute of Technology, 54 p.
- Kuzikov S., Kenigsberg D.V., Salamatina Yu., Prokhorov O.A. 2023. Comparison of methods for computing highly accurate daily GNSS positions. *Civil Engineering Journal*, 9(02): 305-318. https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-02-04
- Shen Z.K., Jackson D.D. **1996.** Crustal deformation across and be yond the Los Angels Basin from geodetic measurements. *Journal of Geophysical Research*, 101(B12): 27957–27980.
- 13. Shen Z.K., Jackson D.D. **2015.** Optimal interpolation of spatially discretized geodetic data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(4): 2117–2127. https://doi.org/10.1785/0120140247
- Седов Л.И. 1970. Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 492 с.
- 15. Каргин В.Р., Каргин Б.В. **2015.** *Механика сплошных сред.* Ч. 1. Самара: Изд-во СГАУ, 76 с.
- Костюк А.Д., Sagiya Т., Зубович А.В. 2006. Сравнение распределения сейсмичности и поля деформации в Северном Тянь-Шане. Вестник КРСУ, 6(3): 64–70.
- Сычева Н.А., Мансуров А.Н. 2017. Сравнение оценок деформаций земной коры Бишкекского геодинамического полигона на основе сейсмологических и GPS-данных. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 809–825. https://doi.org/10.5800/ GT-2017-8-4-0318

References

1. Molnar P., Tapponnier P. **1975.** Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, 189(4201): 419–426.

- Abdrakhmatov K.Ye., Aldazhanov S.A., Hager B.H., Hamburger M.W., Herring T.A., Kalabaevll K.B., Makarov V.I., Molnar P., Panasyuk S.V., Prilepin M.T. et al. **1996.** Relatively construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of presentday crustal deformation rates. *Letters to Nature*, 384: 450–453.
- Zubovich A.V., Wang X.-Q., Scherba Y.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O.I., Molnar P., Michajljow W., Makarov V.I., et al. 2010. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions. *Tectonics*, 29(TC6014). https://doi.org/10.1029/2010TC002772
- Ischuk A., Bendick R., Rybin A., Molnar P., Khan S., Kuzikov S., Mohadjer S., Saydullaev U., Ilyasova Z., Schelochkov G. et al. 2013. Kinematics of the Pamir and Hindu Kush regions from GPS geodesy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118: 2408–2416. https://doi.org/10.1002/jgrb.50185
- Kuzikov S.I. 2019. The ratio of tectonic structure and modern movements of the crust in area of geodynamic proving ground in Bishkek. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 324(012011). https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012011
- Replumaz A., Tapponnier P. 2003. Reconstruction of the deformed collision zone between India and Asia by backward motion of lithospheric blocks. *Journal of Geophysical Research*, 108(2285). https://doi. org/10.1029/2001JB000661
- Flesch L.M., Haines A.J., Holt W.E. 2001. Dynamics of the India-Eurasia collision zone. *Journal of Geophysical Research*, 106: 16435–16460.
- Kuzikov S.I., Mukhamediev S.A. 2010. Structure of the present-day velocity field of the crust in the area of the Central-Asian GPS network. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 46(7): 584–601. https://doi.org/10.1134/ S1069351310070037
- Kuzikov S.I. 2014. Methodical questions and accuracy problems of GPS observations by the example of the geodynamic proving ground in Bishkek. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 50(6): 770–784. https://doi.org/10.1134/S1069351314060032
- Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C. 2010. Introduction to GAMIT/GLOBK: Release 10.7. Technical report. Massachusetts Institute of Technology, 54 p. URL: http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf (дата обращения 10.09.20).
- Kuzikov S., Kenigsberg D.V., Salamatina Yu., Prokhorov O.A. 2023. Comparison of methods for computing highly accurate daily GNSS positions. *Civil Engineering Journal*, 9(02): 305–318. https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-02-04
- 12. Shen Z.K., Jackson D.D. **1996.** Crustal deformation across and be youd the Los Angeles Basin from geodetic measurements. *Journal of Geophysi*-

cal Research, 101(B12): 27957–27980. https://doi. org/10.1029/96jb02544

- Shen Z.K., Jackson D.D. 2015. Optimal interpolation of spatially discretized geodetic data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(4): 2117–2127. https://doi.org/10.1785/0120140247
- 14. Sedov L.I. **1970.** [*Continuum mechanics*]. Book 1. Moscow: Nauka, 492 p. (In Russ.).
- 15. Kargin V.R., Kargin B.V. **2015.** *Continuum mechanics.* Part 1. Samara: SSAU Publ. House, 76 p. (In Russ.).

Об авторах

Кузиков Сергей Иванович (https://orcid.org/0000-0002-7300-0314), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории изучения современных движений земной коры методами космической геодезии, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия, ksi@gdirc.ru

Прохоров Олег Александрович (https://orcid.org/0000-0001-9408-453Х), младший научный сотрудник лаборатории изучения современных движений земной коры методами космической геодезии, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Киргизия, helgpro@yandex.ru

Поступила 19.08.2024 Принята к публикации 20.10.2024

- Kostyuk A.D., Sagiya T., Zubovich A.V. 2006. Comparison of seismicity distribution and deformation field. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta*, 6(3): 64–70. (In Russ.).
- Sycheva N.A., Mansurov A.N. 2017. Comparison of crustal deformation rates estimated from seismic and GPS data on the Bishkek geodynamic polygon. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 809–825. (In Russ.). https://doi.org/10.5800/gt-2017-8-4-0318

About the Authors

Kuzikov, Sergey I. (https://orcid.org/0000-0002-7300-0314), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Leader of the Laboratory of studying modern movements of the Earth's crust by space geodesy, Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Bishkek city, Kyrgyzstan, ksi@gdirc.ru

Prokhorov, Oleg A. (https://orcid.org/0000-0001-9408-453X), Junior Researcher of the Laboratory of studying modern movements of the Earth's crust by space geodesy, Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Bishkek city, Kyrgyzstan, helgpro@yandex.ru

> Received 19 August 2024 Accepted 20 October 2024