УДК 551.24+528 doi: 10.30730/2541-8912.2018.2.4.290-301

Деформирование разломных зон по данным линейно-угловых измерений на Бишкекском геодинамическом полигоне

© С. И. Кузиков
Научная станция РАН, г. Бишкек, Кыргызстан
E-mail: ksi@gdirc.ru

Еженедельный режим фиксации длин (до 3 км) 44 базовых линий за 2012–2016 гг. на 3 площадках Бишкекского геодинамического полигона (Центральный Тянь-Шань), разнесенных на 5–13 км вдоль зоны активного разлома, выявил наличие импульсных (упругих) деформационных событий как минимум четырех видов: 1) изотропные в плане короткопериодные (6–7 дней) синхронные удлинения всех линий на всех площадках до 4 см с деформацией до 2.3×10^{-4}; 2) анизотропные изменения длин для группы линий в течение 3–4 мес., с удлинением до 11 мм (7.3×10^{-5}) линий северного направления и укорочением до –8 мм (-4.4×10^{-5}) линий восточного направления. При этом по всем направлениям плавное нарастание значений к экстремуму и затем сравнительно резкий спад к фону; в широтном направлении запаздывание начала, экстремума и окончания событий на 1–3 недели; 3) в течение 4–5 мес. удлинение по северному направлению до 9 мм и по восточному до 2 мм. При этом по всем направлениям экстремумы по времени смещены к началу события, и затем наблюдается плавный спад к фону; 4) изменение длин на отдельных базовых линиях только в одном из направлений в плане. Прямолинейная аппроксимация для фоновых вариаций длин позволила оценить за 5-летний интервал наблюдений устойчивые тенденции базовых линий к удлинению или укорочению со скоростью до 1–2 мм/год, что соответствует скорости деформации 10^{-6}–10^{-7} год$^{-1}$ и хорошо согласуется с GPS-данными.

Ключевые слова: современные движения, линейно-угловые измерения, измерения длин, базовые линии, деформационные события.

Deformation of fault zones according to linear-angle measurements at the Bishkek geodynamic test site

Sergey I. Kuzikov
Research Station of RAS in Bishkek Sity, Kyrgyzstan
E-mail: ksi@gdirc.ru

At the Bishkek geodynamic test site (Central Tien Shan) 3 geodesic sites are located in the east-west direction along the active fault zone, at 5–13 km distance each from other. Four types of pulsed (elastic) deformation events have been detected on 44 baselines of these geodesic sites as a result of weekly linear-angular measurements for 2012–2016. First, it is isotropic type in terms of short-period (6–7 days) synchronous elongations of all baselines in all geodesic sites up to 4 cm and strain up to 2.3×10^{-4}. The second is that the lengths of baselines anisotropically changes within 3–4 months: the north direction lines are extended to 11 mm (7.3×10^{-5}) and the east direction lines are shortened to –8 mm (-4.4×10^{-5}). In all cases there is a smooth increase or decrease in the length of the lines to the extremum and then a relatively sharp decline to the background values, in the latitudinal direction there is a delay of the deformation event by 1–3 weeks. In the third type, the north direction lines are extended to 9 mm and the east direction lines are extended to 2 mm. For all directions of the baselines within 4–5 months extremes of length changes are shifted to the beginning of the event in time and then there is a smooth transition to background values. The fourth type is that the length of only one baseline of any direction changes noticeably over time. The rates of steady elongation or shortening of baselines to 1–2 mm/year have been calculated using the straight-line approximation method for the values of background variations of their lengths over 5 years of measurements. This corresponds to a strain rate of 10^{-6}–10^{-7} year^{-1} and is in good agreement with GPS data.

Keywords: modern movements, linear-angular, length measurements, base lines, deformation events.

Исследования проводились в рамках государственного задания Научной станции РАН в г. Бишкеке по Программе фундаментальных научных исследований IX.128, тема: «Изучение современных движений земной коры Центральной Азии с использованием средств космической геодезии» (№ 0155-2018-0002).

Введение

Научная станция РАН в г. Бишкеке (НС РАН) расположена в горах Северного Тянь-Шаня и с 1980-х годов проводит высокоточные геодезические измерения с целью количественной оценки отражения геодинамических процессов на поверхности Земли. Так, многолетние измерения в пределах Центрально-Азиатской GPS-сети позволили получить количественные данные о распределении устойчивых современных движений земной коры на территории ~2 млн км^2. В этом регионе максимальная скорость укорочения дистанций между реперами достигает –3 см/год на ~1.1 тыс км в меридиональном направлении и максимальная скорость удлинения земной коры в ~2 см/год на ~1.4 тыс км проявляется по широте. Такой уровень современных движений в региональном плане соответствует скорости деформации порядка 10^{-8} год$^{-1}$ [Zubovich et al., 2010; и др.].

В Тянь-Шаньском регионе на основе космогеодезических данных стало возможным в горизонтальной плоскости построить кинематическую модель квазижестких доменов (блоков), в очертаниях которых, направлениях междоменных зон и направлениях движений по ним обнаруживается закономерность [Кузиков, Мухамедиев, 2010]. В этом случае скорости устойчивых движений между почти жесткими участками доменов составляют 1–10 мм/год для расстояний в 10–100 км, что соответствует скорости деформации 10^{-7} год$^{-1}$. Следует отметить, что максимальная концентрация движений коры в Центральной Азии приходится на фронтальную зону 40–60 км между Памиром и Тянь-Шанем, где скорость смещения достигает 15 мм/год [Ischuk et al., 2013].

При этом естественным образом возникает вопрос о характере и количественной оценке реализации подобного рода движений на более локальном масштабном уровне как в пространстве, так и во времени. Блочные структуры выделялись и в других регионах земной коры, при этом на границах таких структурных образований инструментально фиксируются деформации, превышающие в десятки раз соответствующие деформационные уровни для их ближайшего пространственного окружения [Современная геодинамика... , 1989; Kanamori, Brodsky, 2004]. Для разломных зон в асейсмичных и сейсмоактивных регионах (Припятская впадина, Копетдаг, Камчатка) на основе многолетних нивелировочных наблюдений выявлены «суперинтенсивные деформации» [Кузьмин, 1996, 2002, 2014]. В этом случае для современных вертикальных движений земной поверхности характерны: высокая амплитуда (5–7 см/год), короткие периоды (0.1–1.0 год), пространственная локализация (0.1–1.0 км), пульсационная и знакопеременная направленность, высокий уровень скорости деформирования ($2–7 \times 10^{-5}$ год$^{-1}$). Следует заметить, что зоны повышенных деформаций в региональном масштабе могут быть достаточно широкими (чаще всего из-за недостаточной плотности сети наблюдений) и пространственно не совпадать с трассами геологических разломов [Кузиков, Мухамедиев, 2010].

На текущий момент, по мнению ведущих специалистов, разломные зоны земной коры инструментально изучены довольно слабо. Отсюда следует отсутствие обоснованных факторов от микро- до макроуровней, ответственных за реализацию того или иного деформационного режима движений в зоне разлома [Кочарян, 2016]. И конечно, одним из важных условий при этом является условие проведения опытов и измерений непосредственно в массиве горных пород для определения их свойств и состояния в естественном залегании (in situ).

В пределах Северного Тянь-Шаня располагается Бишкекский геодинамический полигон (БГП), в центральной части которого находится столица Кыргызстана. Территория БГП не имеет четко очерченных границ, в восточном направлении она протягивается примерно на 300 км и в северном – на 200 км. Уже 40 лет здесь выполняются комплексные геофизические экспериментальные исследования земной коры: электромагнитные наблюдения и воздействия, сейсмологические и геодезические измерения. С 2006 г. сотрудники НС РАН проводят комплексные геодезические измерения в пределах БГП, которые включают в себя

GPS, линейно-угловые и нивелировочные измерения на площадках с дистанциями между фундаментальными реперами от первых сотен метров до 2.5 км. В нашем случае нивелировочные работы 1 класса на геодезических площадках проводились 1–3 раза в год в течение 2006–2016 гг. При этом суммарные и межциклические изменения относительных превышений между фундаментальными реперами составляют 1–3 мм и незначительно превышают ошибки измерений, поэтому являются малоинформативными. Эпизодические GPS-опросы реперов площадок 4 раза в год также не позволяют в деталях оценить характер деформационного режима исследуемой территории. Станции непрерывных GPS-наблюдений удалось организовать только на 4 реперах одной площадки. По данным нашего сравнительного анализа, на дистанциях до 3 км линейно-угловые измерения (ЛУИ) более оперативны при получении конечного результата опросов и более устойчивы при относительном позиционировании по отношению к данным прецизионных GPS-наблюдений.

В этой работе рассматриваются результаты еженедельных ЛУИ, которые дают оценку характера и уровня современных движений земной коры в локальном масштабе. Первоначальная цель данных работ заключалась в проверке предположения о том, что зоны активных разломов могут выступать в качестве ослабленных сегментов земной коры, где более отчетливо проявляются деформации. В последующем стало понятно, что площадной охват зоны разлома дает возможность исследовать более широкий круг вопросов, включая оценку характера и уровня движений вдоль и вкрест простирания его трассы относительно сторон света. Насколько нам известно, площадные линейно-угловые наблюдения с дискретностью в неделю на нескольких сегментах активных разломов проводятся впервые как минимум в Тянь-Шаньском регионе. Есть надежда, что такие исследования привнесут важную информацию для понимания характера и уровня деформационного режима не только на территории наших исследований, но для всей земной коры в целом.

Данные для анализа

Геодезические площадки БГП расположены в северных предгорьях Киргизского хребта. С июня 2012 г. по настоящее время регулярным ЛУИ подлежат 3 фундаментальные площадки, разнесенные на 5–13 км по широте вдоль Шамсинского разлома: Полигон, Кентор и Алмалы (рис. 1).

Площадки оснащены фундаментальными реперами в количестве от 6 до 14, отстоящими друг от друга на расстоянии от 150 м до 2.5 км. Еженедельному измерению на площадках подлежат от 10 до 23 базовых линий (БЛ). Помимо прочих (неважных для оценки геодинамической обстановки) параметров при проведении ЛУИ фиксируются наклонная длина и вертикальный угол БЛ, а также горизонтальный угол между 2 линиями с одним общим репером. При проведении ЛУИ на двух опорных для БЛ реперах измеряется температура, давление и влажность. Затем усредненные показатели вводятся оператором в тахеометр, который после этого вносит поправки в результаты измерений в автоматическом режиме. По техническим характеристикам для данного типа тахеометров допускается погрешность в 1 мм на 1 км длины измеряемой

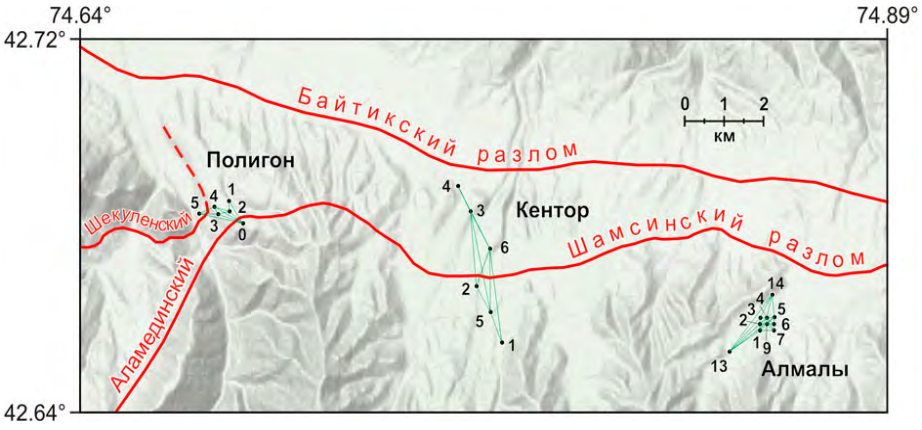

Рис. 1. Положение детальных геодезических площадок Полигон, Кентор и Алмалы относительно активных разломов. Числа и точки – номера фундаментальных реперов, которые соединяют базовые линии для линейно-угловых измерений.

дистанции. Мы надеемся, что принятая в нашем случае и представленная ниже методика ЛУИ позволяет получать максимально возможные по точности результаты в конкретных условиях проведения работ.

Каждая БЛ между двумя реперами за один цикл измеряется в двух направлениях с разницей 5–10 мин при работе с двумя тахеометрами или с разницей до 2–3 ч при работе с одним тахеометром. В результате одностороннего измерения БЛ в памяти тахеометра (в зависимости от его вида) делается в среднем 5 записей с автоматическим усреднением по 10 отсчетам (Leica TC2003) или 20 записей с одиночным замером параметров (Leica TS09). По каждому циклу опроса площадки в памяти тахеометра формируются файлы в формате GSI. Один цикл опроса одной БЛ на площадках БГП дублируется двумя разнонаправленными сериями и общим статистическим объемом выборки для усреднения, как правило, в 70–100 отсчетов. При камеральной обработке измеренные параметры сравниваются на двустороннюю сходимость, что в итоге значительно сокращает возможность вовлечения случайных данных в дальнейший анализ.

В данной работе проанализированы вариации длин 44 линий на 3 площадках БГП за период 2012–2016 гг. По причине ограниченности в объемах графического материала здесь будут приведены только отдельные графики временных рядов длин БЛ, которые отражают основные разновидности и дают представление об общем характере современных движений земной коры.

Результаты линейных наблюдений на геодезических площадках БГП

Геодезическая площадка Полигон частично перекрывает территорию НС РАН и имеет 6 многоцелевых фундаментальных реперов, удаленных друг от друга на 217–1183 м и с максимальной разностью высот до 300 м. Локальные особенности рельефа и положение реперов обеспечивают прямую видимость и ЛУИ только для 11 базовых линий (рис. 2).

Здесь сеть БЛ охватывает территорию НС РАН и пересекает зоны двух активных разломов, которые имеют различные структурно-кинематические особенности в геологическом плане. Так, Шекуленский взброс имеет север-северо-западные падения плоскости сместителя, обеспечивая надвигание в южных румбах девонских эффузивных пород на палеоген-неогеновые отложения. Кинематическая пара Аламединского и Шамсинского разломов, напротив, имеет юго-восточные падения и способствует реализации взброса к северу ордовикских гранитоидов на тот же блок палеоген-неогеновых пород. Но эта геологическая структура уже была сформирована задолго до начала инструментальных наблюдений, и совсем не обязательно, что она должна полностью соответствовать современной кинематической структуре.

Несомненно, представляет интерес детальный анализ вариаций длин и углов как каждой в отдельности БЛ, так и соотношение этих данных по БЛ между собой. Для целей данной работы из 11 БЛ представим данные только по нескольким типичным примерам, которые отражают общий характер и уровень современных движений земной коры на этой площадке (рис. 3).

Как следует из представленного материала, здесь нашли отражение синхронные удлинения всех БЛ: 08.08.2012 на ~35 мм; 22.12.2014 на 17–20 мм. Удлинение 01.03.2013 на 8–10 мм затронуло все БЛ, кроме 3 линий: P1=2, P2=3, P2=4*. Причем длительность таких деформационных всплесков упругих удлинений БЛ не превышает 7–10 дней. Из представленных выше временных рядов длин БЛ (рис. 3) видно, что значения короткопериодных всплесков на графиках в несколько раз превышают фоновый уровень вариаций. При таком масштабе отражения весьма затруднительно оценить детально фоновые вариации длин БЛ, которые также могут нести полезную информацию для анализа. Опыт многочисленных случаев построения временных рядов длин БЛ на БГП показал, что если применить опера-

*Название БЛ (например, P2=4) состоит из наименования одного реперного пункта (P2), знака двунаправленного измерения линии (=) и номера второго пункта (4).

цию удаления из временного ряда выбросов >5 мм относительно ближайших по времени значений, то фоновые вариации становятся доступными для детального рассмотрения и численной оценки параметров прямолинейного тренда (рис. 4). При этом потеря информации составляет <5 %, что не может быть критичным для достоверной оценки фоновых значений. Поэтому здесь и далее для представляющих интерес отдельных временных рядов длин линий БГП будет применяться такая аналитическая операция масштабирования.

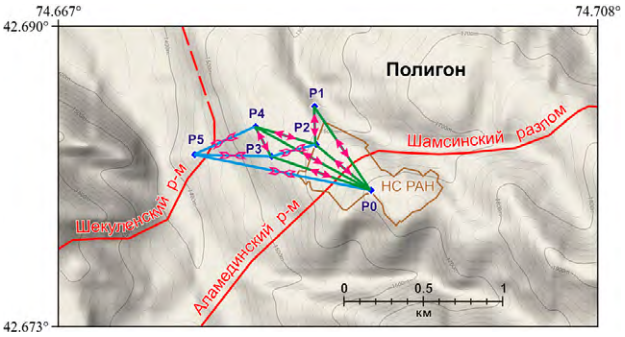

Рис. 2. Положение реперов (P0, P1, и т.д.) и БЛ для линейно-угловых измерений на геодезической площадке Полигон по отношению к активным разломам и территории НС РАН. Стрелками показаны устойчивые тенденции удлинения или укорочения длин линий в результате 204 циклов измерений за 2012–2016 гг.

Обычно для ЛУИ характерно некоторое закономерное укорочение длин БЛ в холодные месяцы и их удлинение в жаркие сезоны. Однако здесь фоновые вариации лишь отдаленно напоминают волнообразный сезонный ход. Очевидно, что при этом далеко не всегда волнообразные удлинения и укорочения связаны с состоянием атмосферы (температуры, давления и влажности) при прохождении в ней дальномерного луча. Скорее всего, здесь в большей мере играет роль тектонический фактор. Стоит обратить внимание, что практически во всех временных рядах прослеживается многолетняя линейная тенденция ежегодного укорочения или удлинения. Параметры для всех БЛ площадки Полигон, полученные на основе данных ЛУИ, сведены в табл. 1.

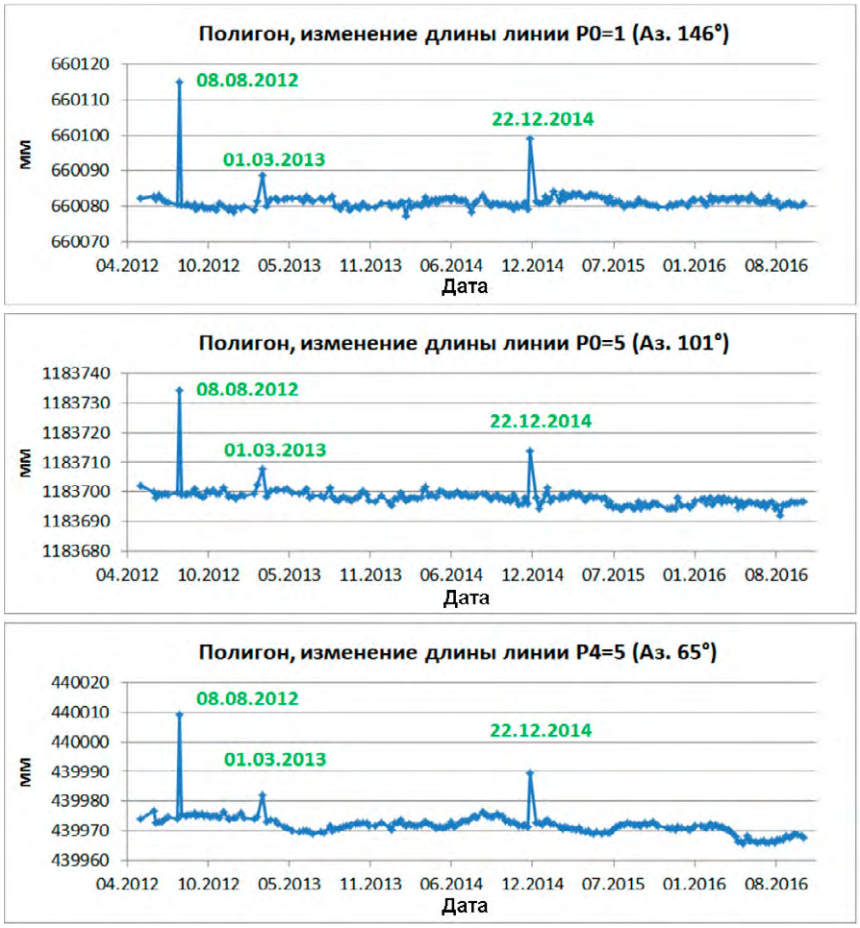

Рис. 3. Характерные вариации длин БЛ площадки Полигон по данным ЛУИ.

Скорость устойчивого многолетнего изменения длин линий площадки Полигон варьирует по модулю от 0.21 до 1.26 мм/год. Скорость деформации удлинения меняется от 0.35 до 3.63 (в среднем 1.34) $\times 10^{-6}$ год$^{-1}$. Удлинению подвержены 7 БЛ с простираниями от 107 до 178° (в среднем 134°), максимальное удлинение приходится на 178°. Только 4 линии из 11 имеют тенденцию укорочения со скоростью < –1 мм/год, но при этом скорость деформации меняется от –1.17 до –3.45 (в среднем –2.43) $\times 10^{-6}$ год$^{-1}$. Таким образом, на площадке более интенсивно проявлены скорости укорочения, и приурочены они к БЛ с азимутами простирания от 65 до 101° (в среднем 83°), максимальное укорочение приходится на 75°. Более

Таблица 1. **Параметры БЛ площадки Полигон по данным линейно-угловых измерений**

Параметр	Базовые линии										
	P0=1	P0=2	P0=3	P0=4	P0=5	P1=2	P2=3	P2=4	P3=4	P3=5	P4=5
Длина L, м	660	472	689	860	1183	245	293	405	217	506	439
Азимут, °	146	130	109	119	101	178	75	107	152	91	65
Скорость изменения L, мм/год	0.23	0.80	0.53	1.19	–1.01	0.89	–1.01	0.21	0.23	–1.12	–1.26
Скорость деформации, $\times 10^{-6}$ год$^{-1}$	0.35	1.70	0.77	1.38	–1.17	3.63	–3.45	0.52	1.06	–2.21	–2.87

наглядно тенденции современных движений на площадке Полигон отражены на рис. 2.

Все БЛ, сопряженные с пунктом P5, имеют тенденцию к укорочению, скорее всего, это связано с движениями по Шекуленскому разлому. Следует отметить, что из 11 БЛ площадки Полигон только на двух БЛ (P0=5 и P1=2), по данным ЛУИ и GPS, наблюдаются различия в направлении устойчивых движений. Подобное несоответствие, скорее всего, исчезнет при увеличении временного ряда эпизодических наблюдений GPS-методом.

Площадка Кентор, которая тоже пространственно пересекает зону Шамсинского разлома (рис. 1, 5), располагается примерно в 6 км восточнее от площадки Полигон. Здесь установлено также 6 многоцелевых фундаментальных реперов, на базе которых измерению подлежат 10 линий с дистанциями от 700 до 2500 м и максимальным вертикальным превышением друг относительно друга до 185 м. В этом случае инструментальному наблюдению подлежит только зона Шамсинского разлома, с южным падением сместителя и взбросом к северу палеозойских пород на палеоген-неогеновые отложения.

Из 10 вариантов временных рядов длин линий площадки Кентор здесь представлено 3 типичных примера, которые дают представление о характере и уровне движений земной коры на данном участке разломной зоны (рис. 6).

Следует обратить внимание, что синхронные удлинения всех БЛ по площадкам Полигон и Кентор происходили: 03–08.08.2012 на 35–40 мм, 22–24.12.2014 на 15–20 мм. А деформационное событие 01.03.2013 на площадке Полигон носило локальный характер и не нашло отражения на БЛ площадки Кентор. В свою очередь локальное удлинение 20.12.2012 затронуло только линии площадки Кентор, кроме K1=5, K2=5 и K3=5.

Для площадки Кентор характерные формы и тенденции устойчивых многолетних изменений фоновых вариаций длин БЛ без

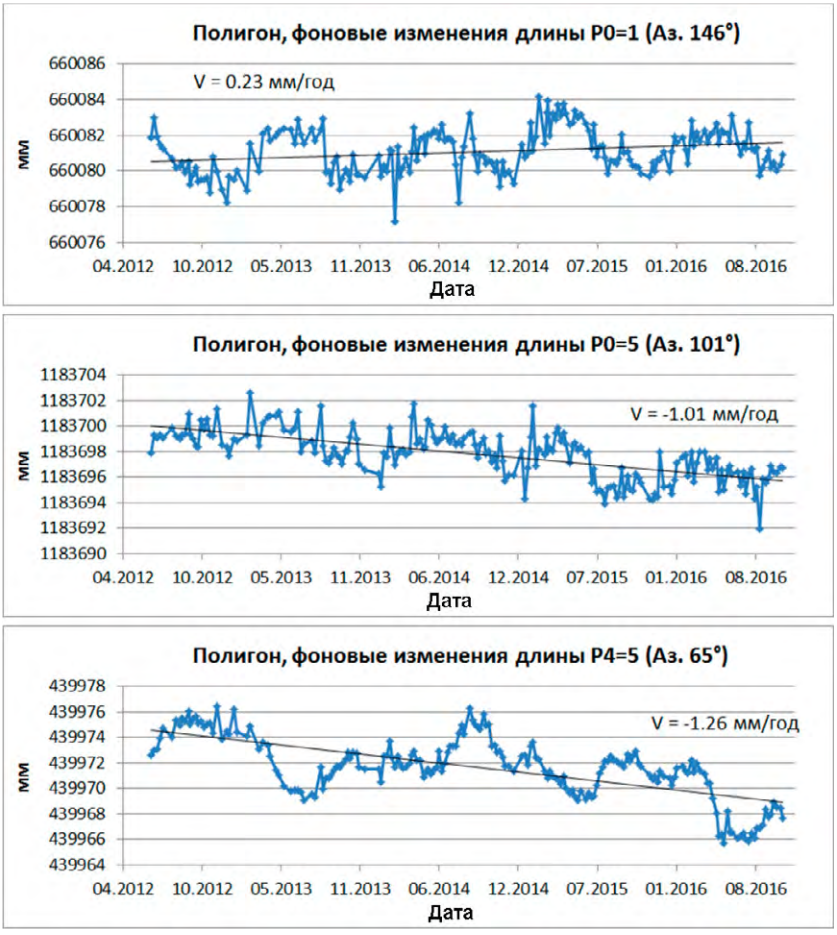

Рис. 4. Показательные фоновые вариации длин БЛ площадки Полигон по данным ЛУИ без экстремальных выбросов >5 мм относительно ближайших соседних значений.

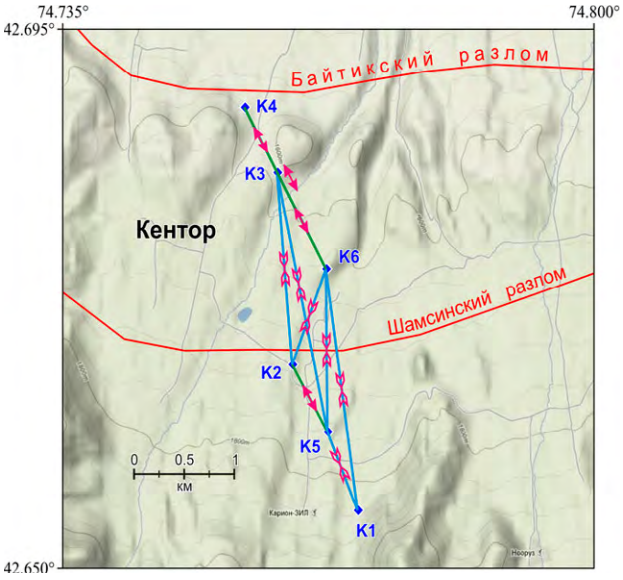

Рис. 5. Положение 6 реперов и 10 линий на геодезической площадке Кентор для линейно-угловых измерений по отношению к активным разломам. Стрелками показаны устойчивые тенденции удлинения и укорочения по линиям площадки Кентор в результате 187 циклов измерений за 2012–2016 гг.

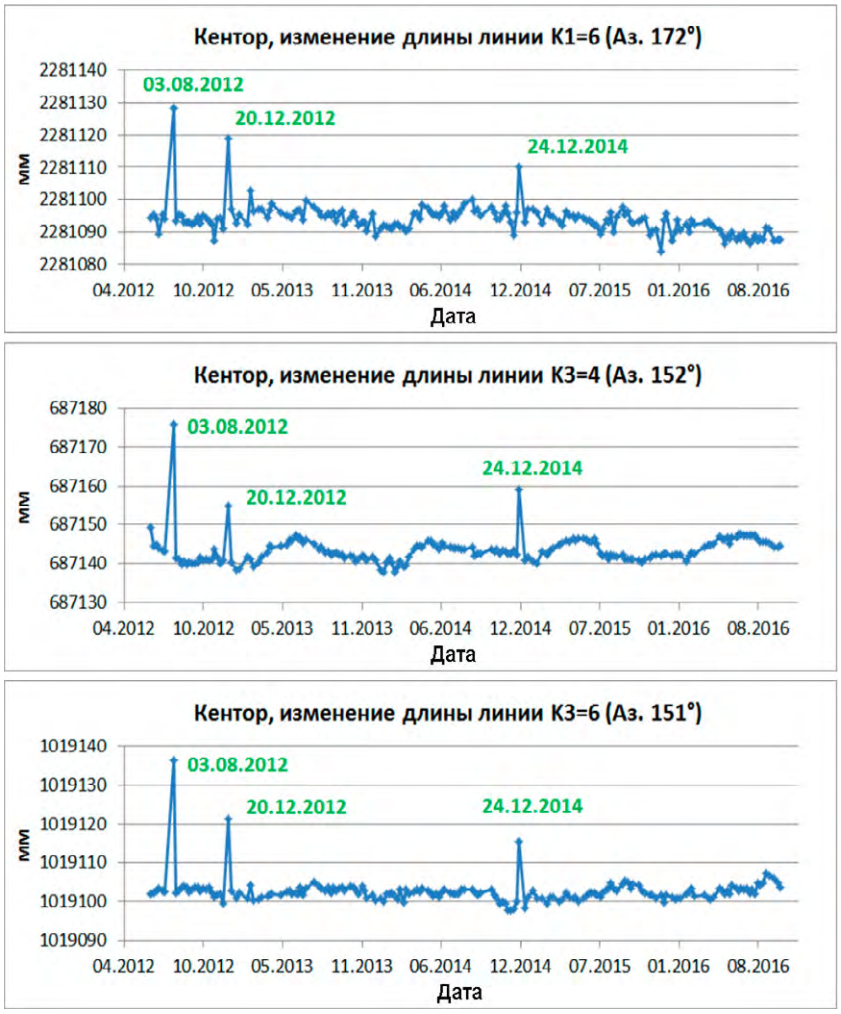

Рис. 6. Характерные вариации длин БЛ площадки Кентор по данным ЛУИ.

экстремальных короткопериодных выбросов показаны на рис. 7.

В этом случае только для линии K3=4 в фоновых вариациях длины довольно отчетливо проявлены сезонные вариации с плавным закономерным укорочением БЛ в зимний период и удлинением летом с размахом амплитуд на 6–8 мм. В остальных случаях фоновые циклические вариации подвержены искажению шумовыми эффектами и тектоническими воздействиями. Параметры всех БЛ площадки Кентор, полученные на основе данных ЛУИ, приведены в табл. 2.

Таким образом, скорость изменения длин БЛ площадки Кентор варьирует по модулю от 0.08 до 1.00 мм/год. Скорость деформации удлинения изменяется от 0.08 до 1.08 (в среднем 0.55) $\times 10^{-6}$ год$^{-1}$. Удлинению подвержены только 4 БЛ с простиранием от 150 до 152° (в среднем 151°), максимальное удлинение приходится на 152°. Из 10 БЛ 6 имеют тенденцию укорочения со скоростью от –0.54 до –0.94 мм/год и скоростью деформации от –0.22 до –0.84 (в среднем –0.51) $\times 10^{-6}$ год$^{-1}$. В среднем здесь по модулю значения деформации укорочения и удлинения примерно равны. Максимальная скорость деформации удлинения 1.08×10^{-6} год$^{-1}$ проявлена по аз. 152°, а максимальная скорость деформации укорочения -0.84×10^{-6} год$^{-1}$ – по азимуту 21°. Кинематическая схема относительного движения реперов в направлениях БЛ на площадке Кентор по данным ЛУИ отражена на рис. 5. Следует отметить, что устойчивые движения по 6 БЛ с опорой на реперы центральной части площадки K2, K3, K5 и K6 по данным ЛУИ и по GPS-наблюдениям полностью совпадают за указанные интервалы наблюдений.

Площадка Алмалы расположена в 7–8 км восточнее от

Таблица 2. **Параметры БЛ площадки Кентор по данным ЛУИ**

Параметр	Базовые линии									
	K1=5	K1=6	K2=3	K2=5	K2=6	K3=4	K3=5	K3=6	K4=6	K5=6
Длина L, м	809	2281	1797	704	960	687	2453	1019	1706	1508
Азимут, °	158	172	175	150	21	152	168	151	151	179
Скорость изменения L, мм/год	–0.59	–0.94	–0.64	0.28	–0.81	0.74	–0.54	0.08	1.00	–0.72
Скорость деформации, $\times 10^{-6}$ год$^{-1}$	–0.73	–0.41	–0.36	0.40	–0.84	1.08	–0.22	0.08	0.59	–0.48

площадки Кентор, ее территория непосредственно не покрывает срединную линию шва Шамсинского разлома и находится на южном его висячем крыле (рис. 1). Для различных целей исследования здесь с 2005 г. установлено 14 фундаментальных тумб с возможностью проведения GPS, ЛУИ и нивелирования. В настоящее время линейно-угловым измерениям подлежат 23 линии, при этом только с апреля 2013 г. начаты ЛУИ на БЛ с участием репера А14 (рис. 8).

Самой короткой измеряемой линией здесь является А2=3 ~149 м, самая длинная – А13=14 ~1750 м. Максимальное относительное превышение между реперами составляет 155 м. Только А13 и А14 установлены на коренных выходах гранитов, остальные тумбы покоятся на верхнечетвертичных отложениях и достаточно устойчивы к экзогенным факторам воздействия.

Из опыта линейно-угловых наблюдений для центрального квадрата площадки наиболее контрастно деформации проявляются в его северо-западной части. Линии, опирающиеся на реперы А2, А3 и А4, проявляют максимальную вариационную активность, что позволяет предположить, что эти тумбы находятся в зоне влияния второстепенного надвига, который субпараллелен Шамсинскому взбросу. В 750 м западнее от А3 его зона дробления (15–20 м истинной мощности) обнажается в техногенном врезе с азимутом падения ~200° и углами падения ~45°. Надвиговая структура разделяет с обеих сторон одни и те же граниты ордовика, но на территории площадки Алмалы разлом перекрыт верхнечетвертичными отложениями.

На магистральных БЛ 660–1133 м здесь фиксируются разнохарактерные деформационные события длительностью от 1–2 недель до 3–4 мес. и изменением длины до 20–30 мм (рис. 9).

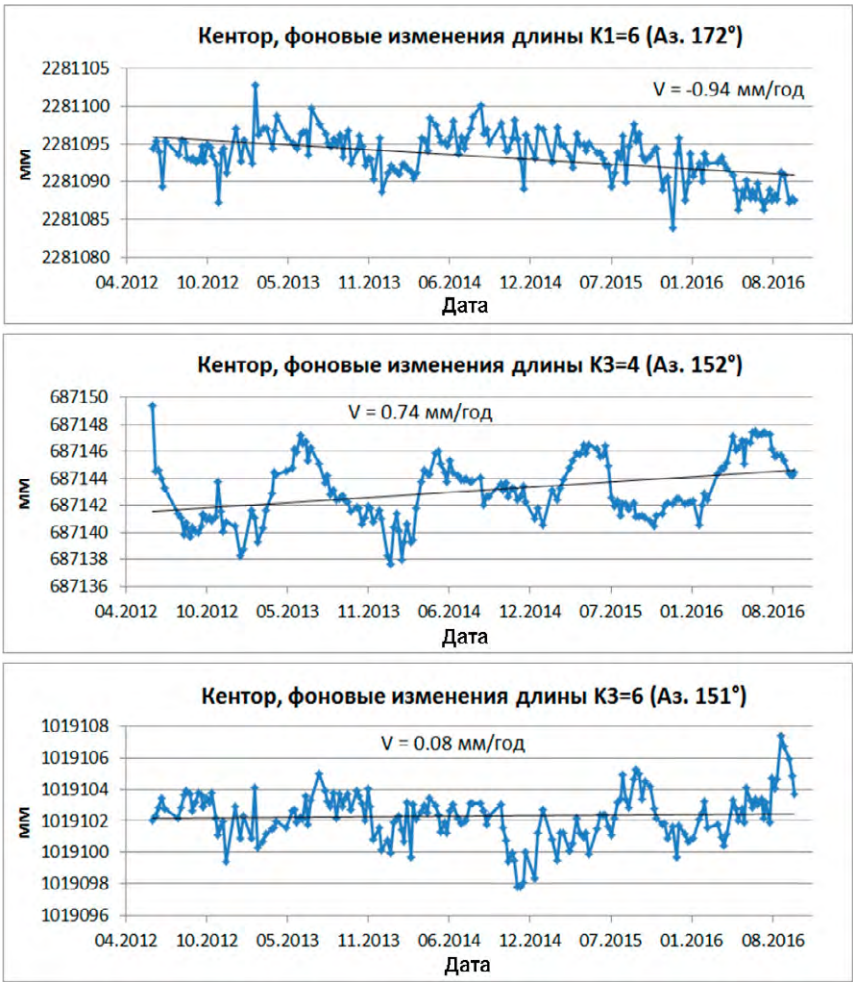

Рис. 7. Фоновые вариации длин БЛ площадки Кентор по данным ЛУИ без экстремальных выбросов >5 мм относительно ближайших значений.

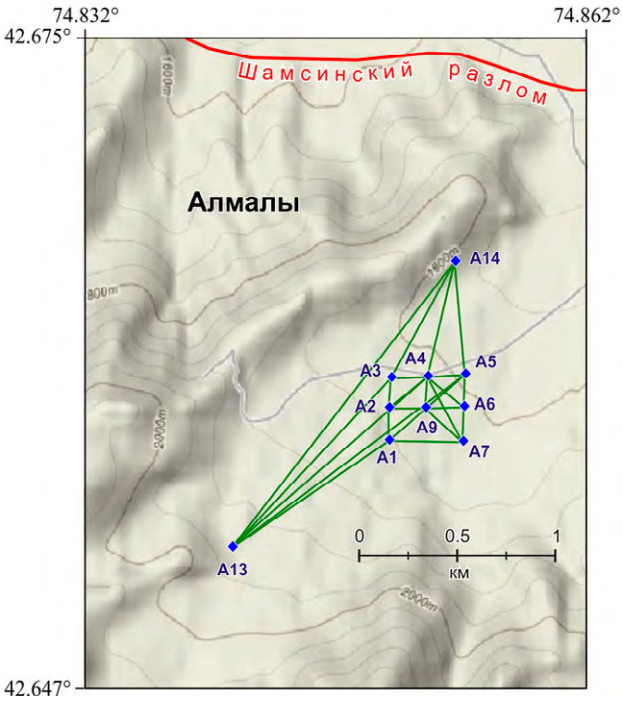

Рис. 8. Положение 10 реперов и 23 БЛ для ЛУИ на площадке Алмалы.

Из вариаций длин БЛ северо-восточного направления и максимальных дистанций следует, что деформационное событие 18.12.2014 длительностью в 2 недели отражается на всех линиях с их удлинением на 15–20 мм. Событие 27.03.2014 с экстремальным отклонением до 12–13 мм реализуется за 3–4 мес., и южная секция удлиняется, а северный сегмент укорачивается. На самой длинной линии A13=14 это событие не отразилось, поэтому рассматриваемая деформация локально связана с ближним пространством репера A3. Прочие деформационные события имеют еще более локальный характер и отражаются только на одной из линий.

На самых коротких линиях площадки (150–180 м), расположенных почти взаимно перпендикулярно (С–Ю и В–З), более детально и отчетливо проявлен ряд деформационных событий (рис. 10).

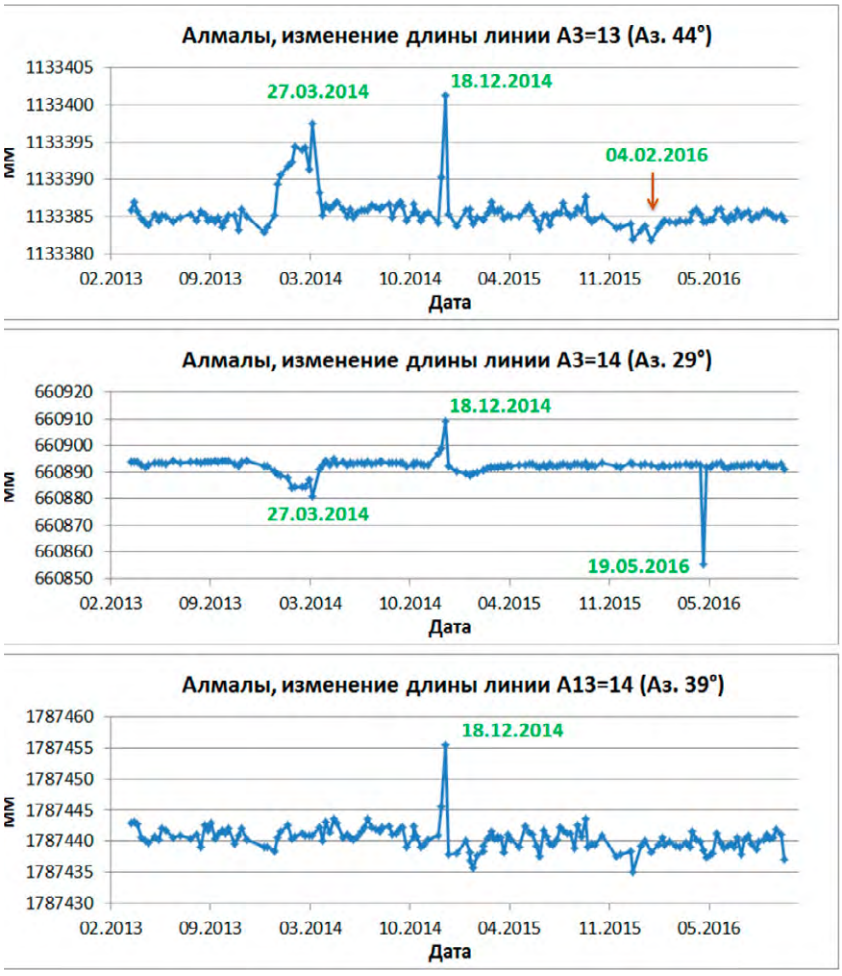

Рис. 9. Вариации длин БЛ площадки Алмалы по данным ЛУИ в направлении максимальных дистанций между реперами A3, A13 и A14.

Очевидно, что короткопериодные (недельные) деформационные события (в феврале 2012 и декабре 2014 г.) являются самыми интенсивными за период наблюдений, и проявились они на всех БЛ БГП через их импульсное удлинение (до 40 мм). При этом на разных линиях одной и той же площадки они фиксируются с разной интенсивностью. Если в срединной части площадки Алмалы на коротких дистанциях деформация составила $(1.9–2.3)\times10^{-4}$, то на магистральных БЛ (рис. 9) – $(1.0–2.7)\times10^{-5}$. Таким образом, здесь проявляется деформационный градиент, который может быть исследован более детально в плане.

Кроме коротких и значительных всплесков длин БЛ на коротких дистанциях, довольно отчетливо отразились 2 деформационных события

(2013 и 2014 гг.) совершенно другой природы (рис. 10). Особенность их заключается в следующем: длительность 3–4 мес. (декабрь–март); в северном направлении удлинение на 6–11 мм ($(4.0–7.3)\times10^{-5}$), в восточном – укорочение на 5–8 мм ($(2.8–4.)\times10^{-5}$); плавное стремление к экстремуму и сравнительно резкое (3–4 недели) завершение события; устойчивое запаздывание на 1–3 недели начала, экстремума и окончания событий по восточному направлению. Несколько иначе проявилось событие 2015 г.: в восточном направлении наблюдалось не укорочение, а плавное незначительное удлинение линии на 2 мм; недельное запаздывание по максимуму проявилось в северном направлении, а не в восточном; от максимумов затухание события было более длительным, чем его начальная фаза.

Таким образом, по результатам 5-летних ЛУИ на 3 площадках БГП получены представления о характере и уровне современных горизонтальных движений земной коры для отдельных сегментов и зон разломов в пределах Северного Тянь-Шаня. При этом выделяются как минимум 4 вида деформационных событий, которые продублированы своим проявлением на нескольких БЛ разных площадок. Достоверность представленного материала подтверждается и синхронными GPS-наблюдениями на этом же наборе геодезических многоцелевых реперов. Хотя надо отметить, что данные ЛУИ на дистанциях до 3 км являются более оперативными и точными по отношению к методам космической геодезии [Кузиков, 2014].

По данным ЛУИ в горизонтальном плане, проявленные здесь типы деформационных событий имеют достаточно большое сходство по амплитуде и длительности с суперинтенсивными деформациями в разломных зонах на территории России, полученными на основе многолетних наблюдений вертикальной компоненты движений [Кузьмин, 1996, 2002, 2014]. Однако представленная информация по горизонтальным типам движений позволила зафиксировать здесь разнотипные деформации с учетом различного характера их проявления по отношению к трассе разлома и к сторонам света.

В результате инструментальных наблюдений открыты и классифицированы режимы перемещений по разломам и трещинам, являющиеся переходными от стабильного скольжения (крипа) к динамическому срыву (землетрясению) [Кочарян, 2016]. Представленные здесь данные линейно-угловых измерений на площадках БГП не только согласуются, но и дополняют представления

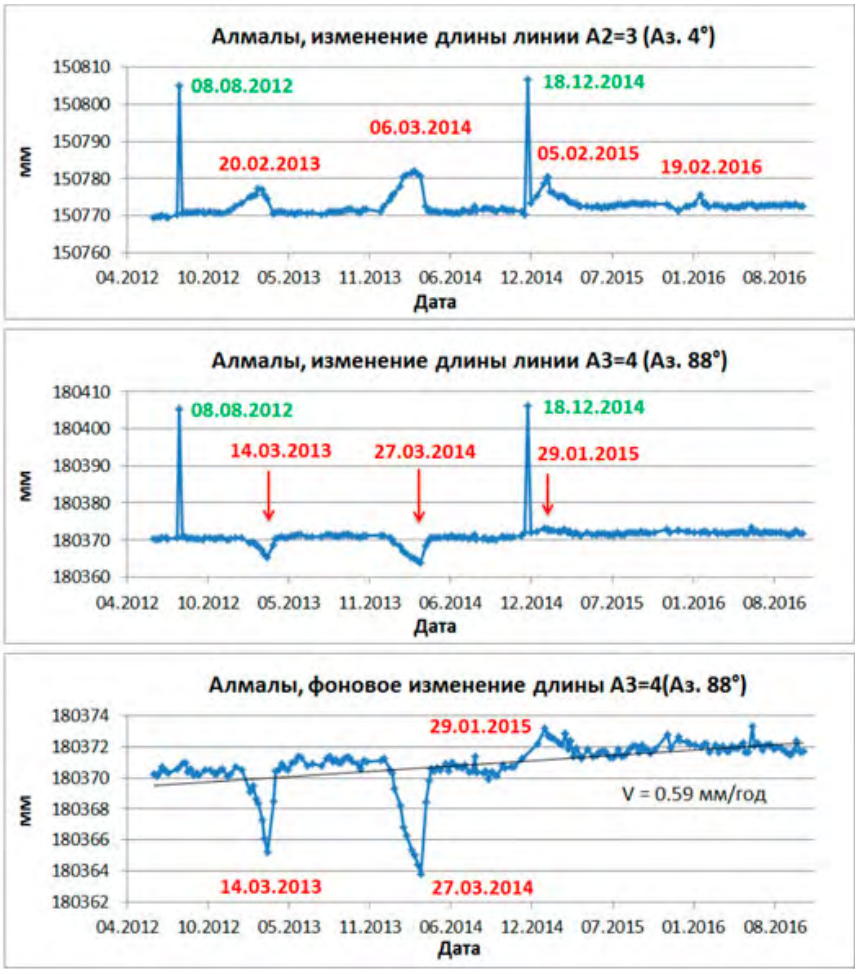

Рис. 10. Вариации длин самых коротких и взаимно перпендикулярных (С–Ю и В–З) БЛ площадки Алмалы по данным ЛУИ.

о едином ряде режимов движения в разломной зоне при реализации энергии, накопленной в процессе деформирования земной коры.

Известно, что по бортам от линии разлома находятся зоны его «динамического влияния» на вмещающие породы, которые могут быть подвержены повышенной трещиноватости или даже дроблению [Шерман и др., 1983]. На площадках БГП проявляются факты неравномерного распределения уровня деформации от одной БЛ к другой и от площадки к площадке.

Заключение

Длительные прецизионные геодезические методы наблюдения за современными приповерхностными движениями земной коры из всех инструментальных геофизических исследований наиболее интуитивно понятны для восприятия. При определенных условиях результаты и данные таких наблюдений могут быть перепроверены и подтверждены. Многолетние космогеодезические измерения позволили оценить уровень и структуру устойчивых региональных движений земной коры. Результаты многолетних линейно-угловых измерений на 3 площадках Бишкекского геодинамического полигона более чем на 90 % подтверждаются результатами параллельных GPS-наблюдений. Но из-за технических и финансовых ограничений далеко не все реперы детальных площадок могут быть обеспечены еженедельной частотой GPS-измерений и, соответственно, сопоставлены с данными ЛУИ. В сложившейся ситуации по доступности, оперативности и точности на дистанциях до 3 км ЛУИ являются наиболее актуальным инструментом для наблюдений за современными движениями земной коры.

Еженедельный режим фиксации длин 44 базовых линий на 3 площадках Бишкекского геодинамического полигона, разнесенных на 5–13 км вдоль зоны активного разлома, позволил достоверно выявить здесь наличие импульсных (упругих) деформационных событий как минимум 4 видов. Во-первых, это изотропные по отношению к направлению в плане короткопериодные (6–7 дней) синхронные удлинения всех линий на всех площадках до 4 см с деформацией до 2.3×10^{-4}. Второй тип – анизотропное изменение длин в группе линий в течение 3–4 мес., с удлинением до 11 мм (7.3×10^{-5}) линий северного направления и укорочением до –8 мм (-4.4×10^{-5}) линий восточного направления. По всем направлениям отмечается плавное нарастание значений к экстремуму и затем сравнительно резкий спад к фону; в широтном направлении – устойчивое запаздывание начала, экстремума и окончания событий на 1–3 недели. Третий тип – в течение 4–5 мес. удлинение по северному направлению до 9 мм и удлинение до 2 мм по восточному. При этом по всем направлениям экстремумы по времени смещены к началу события, и затем фиксируется плавный спад к фону. Четвертый тип – изменение длин на отдельных базовых линиях только в одном из направлений в плане.

Помимо этого угол наклона прямой линии, аппроксимирующий фоновые вариации длин наблюдаемых линий, позволяет понять и количественно оценить параметры устойчивых многолетних деформаций остаточного характера. Так за 5-летний интервал наблюдений базовые линии могут удлиняться или укорачиваться со скоростью до 1–2 мм/год, что соответствует скорости деформации 10^{-6}–10^{-7} год$^{-1}$ и хорошо согласуется с GPS-данными.

На площадках БГП проявляются факты неравномерного распределения уровня деформации от одной БЛ к другой и от площадки к площадке. Более детальные исследования в этом направлении могут дать представление о деформационной зональности и количественных показателях пространственного затухания при проявлении деформационных событий различной интенсивности.

Кроме того, даже из визуальных оценок временных рядов длин БЛ возникает естественное предположение о закономерной цикличности проявления деформационных событий, что также подтверждается данными непрерывных GPS-наблюдений.

Список литературы

1. Кочарян Г.Г. *Геомеханика разломов.* М.: ГЕОС, 2016. 424 с.

2. Кузиков С.И., Мухамедиев Ш.А. Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS сети // *Физика Земли.* 2010. № 7. С. 33–51. [Kuzikov S.I., Mukhamediev S.A. Structure of the present-day velocity field of the crust in the area of the Central-Asian GPS network. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2010, 46(7): 584-601. https://doi.org/10.1134/s1069351310070037]

3. Кузиков С.И. Методические задачи и проблемы точности GPS наблюдений (на примере Бишкекского геодинамического полигона) // *Физика Земли.* 2014. № 6. С. 55–69. [Kuzikov S.I. Methodical questions and accuracy problems of GPS observations by the example of the geodynamic proving ground in Bishkek. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 2014, 50(6): 770-784. https://doi.org/10.1134/s1069351314060032]

4. Кузьмин Ю.О. Современные суперинтенсивные деформации земной поверхности в зонах платформенных разломов // *Геологическое изучение и использование недр.* М.: Геоинформмарк, 1996. № 4. С. 43–53.

5. Кузьмин Ю.О. Современная аномальная геодинамика асейсмичных разломных зон // *Вестник Отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук РАН.* 2002. № 1 . С. 1–27.

6. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. Т. 5, № 2. С. 401–443. https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0135

7. *Современная геодинамика и нефтегазоносность* / под ред. Н.А. Крылова и В.А. Сидорова. М.: Наука, 1989. 199 с.

8. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. *Области динамического влияния разломов (результаты моделирования).* Новосибирск: СО АН СССР, 1983. 110 с.

9. Ischuk A., Bendick R., Rybin A. et al. Kinematics of the Pamir and Hindu Kush regions from GPS geodesy // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2013. Vol. 118 (5). P. 2408–2416. https://doi.org/10.1002/jgrb.50185

10. Kanamori H., Brodsky E.E. The physics of earthquakes // *Reports on Progress in Physics*. 2004. Vol. 67. P. 1429–1496. https://doi.org/10.1063/1.1387590

11. Zubovich A.V., Wang X.-Q., Scherba Y.G. et al. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions // *Tectonics*. 2010. Vol. 29. TC6014. https://doi.org/10.1029/2010TC002772

Сведения об авторе

КУЗИКОВ Сергей Иванович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией изучения современных движений земной коры методами космической геодезии, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Кыргызстан.