

УДК 550.334, 551.243

## ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА НА ТЯНЬ-ШАНЕ И МЕСТНОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 12.02.2013 г.

© 2017 г. Г.А. Соболев<sup>1</sup>, С.И. Кузиков<sup>2</sup>, В.Д. Брагин<sup>2</sup>, Н.А. Сычева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Научная станция РАН в г. Бишкеке, Киргизия*

Представлены результаты комплексных геофизических наблюдений, проводимых Научной станцией РАН на Тянь-Шане на территории Бишкекского геодинамического полигона. Уникальная особенность полигона – периодическое просвечивание земной коры мощными электромагнитными импульсами, благодаря которому была обнаружена реакция сейсмичности на это воздействие. Действующая на полигоне сейсмическая система *KNET* позволяет регистрировать землетрясения с минимальным представительным энергетическим классом  $K=7$  и определять механизмы очагов событий.

Проведены многолетние наблюдения за деформациями земной коры на территории Тянь-Шаня и прилегающих регионов методами спутниковой геодезии. В 2012 г. были организованы еженедельные линейно-угловые измерения на трех площадках с линейными размерами до трех километров, первые результаты которых обсуждаются в настоящей работе. Особое внимание обращено на регистрацию деформаций в разломных зонах, что позволяет перейти к оценкам наблюдаемых изменений тектонических напряжений.

Исследованы вариации нескольких параметров – расстояний между реперами при светодальномерных наблюдениях, деформаций земной поверхности по данным *GPS*, электрического сопротивления на различных глубинах, прослеживаемые с использованием метода становления поля в дальней зоне. Результаты этих наблюдений, сопоставленные с сейсмичностью и механизмами очагов, позволили оценить геодинамическую обстановку в период местного землетрясения, произошедшего 12.02.2013 г. ( $K=10$ ). За несколько суток до этого события по данным *GPS* наблюдений отмечено опускание земной поверхности территории полигона с амплитудой ~20 мм. В период с 7 по 14 февраля 2013 г. по результатам светодальномерных измерений выявлено увеличение в среднем на 8 мм длины измерительных линий, пересекающих разлом, который расположен на расстоянии 2 км от очага землетрясения. Такое увеличение соответствует вариации действующих в районе разлома тектонических напряжений приблизительно на 7 МПа. Делается вывод, что возникновению местного землетрясения способствовало изменение геодинамической обстановки.

**Ключевые слова:** геодинамика, сейсмичность, электрическое сопротивление, землетрясение, смещения, деформации, напряжения.

### Введение

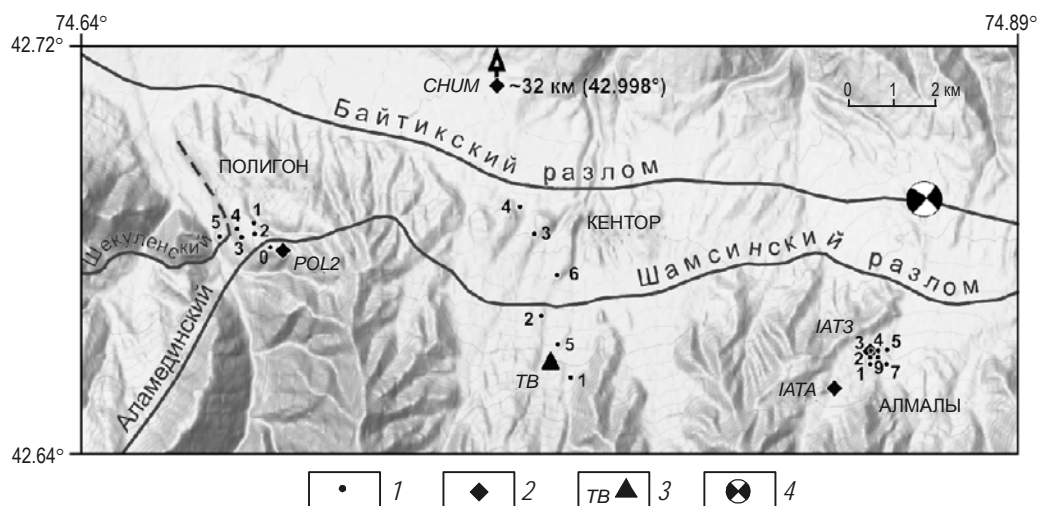
Регулярные комплексные геофизические исследования проводятся учеными Российской академии наук на нескольких полигонах, расположенных в разных районах нашей страны. Наибольший комплекс наблюдений, предполагающий регистрацию и анализ более чем 13 параметров, выполняется на полигоне на Камчатке в зоне субдукции; второй по масштабам проводимых измерений полигон располагается в зоне Байкальского рифта. Наблюдения с меньшим числом измеряемых параметров проводятся на полигонах, находящихся на Курильских островах, о-ве Сахалин, в Приморье, на юге Хабаровского края, в Горном Алтае; на этих полигонах представлены методы космической геодезии, гравиметрии, магнитометрии и электроразведки. В проведении исследований на названных полигонах принимают участие институты Дальневосточного

(Институт вулканологии и сейсмологии, Тихоокеанский океанологический институт, Институт морской геологии и геофизики, Тихоокеанский институт географии) и Сибирского (Институт земной коры, Институт нефтегазовой геологии и геофизики, Институт нефтегазовой геологии и геофизики) отделений РАН, Геофизическая служба РАН и ее Камчатский филиал. Особое место занимает Бишкекский геодинамический полигон, расположенный на Тянь-Шане в зоне континентальной сейсмичности. После распада СССР этот полигон оказался на территории Республики Киргизия, но работавшая на нем в советское время Научная станция РАН по-прежнему функционирует. Уникальная особенность полигона – периодическое просвечивание земной коры мощными электромагнитными импульсами, благодаря чему обнаружена реакция сейсмичности на это воздействие [Сычев и др., 2008, 2010]. В течение многих лет проводятся наблюдения за деформациями земной коры на территории Тянь-Шаня и прилегающих регионов методами спутниковой геодезии *GPS*. В результате этих наблюдений установлены основные характеристики движения блоков [Кузиков, Мухамедиев, 2010], выявлены связи между вариациями электрического сопротивления пород в глубинных слоях земной коры и деформациями ее поверхности [Фридман и др., 2005].

На Бишкекском полигоне работает сейсмическая система *KNET*, позволившая создать однородный сейсмологический каталог с минимальным представительным энергетическим классом  $K=7$ . С использованием этого каталога выявлены пространственные особенности распределения очагов землетрясений в пределах полигона и рассчитаны сотни механизмов очагов землетрясений [Сычева и др., 2005]. Показано, что сейсмичность и механизмы очагов землетрясений реагируют на изменения поля скоростей перемещения точек земной поверхности, вычисляемых по данным *GPS* [Соболев и др., 2010]. Глубинное строение полигона и прилегающих территорий детально изучено методом магнитотеллурического зондирования [Рыбин, 2011; Рыбин и др., 2015].

В 2011 г. перед Научной станцией РАН была поставлена задача исследования вариаций локальных деформаций на Бишкекском полигоне в связи с землетрясениями; при этом особое внимание было обращено на регистрацию деформаций в разломных зонах. Амплитуда как горизонтальных, так и вертикальных движений в разломах на порядок превышает их уровень в прилегающих массивах горных пород [Кузьмин, 2004], что дает возможность перехода к оценке изменения тектонических напряжений. Для решения поставленной задачи в 2012 г. были организованы еженедельные линейно-угловые измерения на площадках КЕНТОР, ПОЛИГОН и АЛМАЛЫ (рис. 1), обсуждению результатов которых посвящена настоящая статья.

При наблюдениях за современными движениями земной коры в геологическом плане интерес представляют активные разломы, которые в пределах территории исследования, как правило, нарушают целостность кайнозойских образований. Основной объект представляемых в статье исследований – Шамсинский разлом (см. рис. 1), имеющий субширотное простирание и южное падение под углом  $50\text{--}60^\circ$ . По плоскости этого разрыва палеозойский фундамент (граниты, гранодиориты и др.) взброшен на палеоген-неогеновые терригенные образования северного лежащего крыла. В своем западном замыкании Шамсинский взброс переходит в Аламединский левый сдвиг (или взбросо-сдвиг) северо-восточного простирания; при этом образована согласующаяся кинематическая пара для тектонического режима длительного меридионального укорочения. Плоскость Аламединского сдвига круто падает на юго-восток под углом  $70\text{--}80^\circ$ . Расположенная у западной границы территории исследований геодезическая площадка ПОЛИГОН (см. рис. 1) захватывает восточное замыкание Шекуленского разлома, плоскость которого имеет северное падение с углами  $40\text{--}50^\circ$ , что довольно необычно для горного обрамления Чуйской впадины. По плоскости данного разрыва терригенно-эффузивные образования девона уже с севера надвинуты на тот же разрез кайнозойских отложений.



**Рис. 1.** Схема исследуемой территории с указанием местоположения площадок линейно-угловых наблюдений ПОЛИГОН, КЕНТОР И АЛМАЛЫ (1), пунктов GPS измерений IATA, IAT3, POL2, CHUM<sup>1</sup> (2), станции зондирования методом становлением поля в дальней зоне (3) и эпицентра землетрясения 12.02.2013 г. (4 – фокальный механизм очага). Сплошные линии – активные разломы. На каждой площадке приведены номера реперов

К сожалению, степень обнаженности рассматриваемой территории не позволяет непосредственно наблюдать шовные зоны активных разломов, но они трассируется задернованными участками шириной в первые десятки метров, отделяющими явно различные палеозойские и кайнозойские образования. Кроме того, ближайшие к разломному шву породы отличаются более интенсивной трещиноватостью и содержанием кварц-кальцитовых прожилков. Довольно часто в створе разломов проявляются геоморфологические уступы.

По южному обрамлению Байтикской впадины в виде отчетливого геоморфологического уступа прослеживается одноименный разлом запад–северо-западного простирания и южного падения под углом 60–70°. Оба крыла этого разрыва сложены палеоген-неоген-четвертичными отложениями; тектоническая структура разлома говорит скорее всего о его взбросовом характере.

### Результаты измерений длин базовых линий

Все реперы площадок КЕНТОР, ПОЛИГОН и АЛМАЛЫ представляют собой фундаментальные железобетонные тумбы, которые установлены по правилам закладки соответствующих пунктов наблюдения и могут быть использованы практически для любых видов геодезических наблюдений. Линейно-угловые измерения осуществлялись тахеометрами *Leica* с электронной записью целого ряда параметров, основными из которых являются длина измеряемой линии, вертикальный и горизонтальный углы.

В данной работе анализируются только расстояния, полученные автоматически по времени прохождения инфракрасного луча от репера с тахеометром до репера с отражателем и обратно. Для каждого отдельного измерения базовой линии в прибор вводятся поправки в виде средних значений температуры, давления и влажности, измеренные у двух реперов базовой линии. При этом для каждого измерения производится от

<sup>1</sup> Станция CHUM находится примерно в 32 км к северу от границы территории, представленной на рис. 1.

20 до 50 отдельных отсчетов тахеометра с последующим их усреднением. Прямое линейно-угловое измерение от репера 1 к реперу 2 сопровождается обратным измерением (от репера 2 к реперу 1) в течение от 5 мин до 2 ч в зависимости от количества используемых приборов и сложности схемы передвижения между реперами.

При анализе результатов измерительные линии были разделены на две группы. В первую включены линии, пересекающие выходящую на поверхность трассу Шамсинского разлома вкрест его простирания, во вторую – не пересекающие разлом (табл. 1). На площадке АЛМАЛЫ нет линий, пересекающих трассу разлома, поэтому на ней в группу I включены субмеридионально ориентированные линии (в табл. 1 выделены жирным шрифтом).

**Таблица 1.** Измерительные линии, использованные при анализе результатов дальномерных измерений на Бишкекском полигоне

Площадка	Положение измерительных линий относительно трассы Шамсинского разлома	
	Группа I (пересекающие)	Группа II (не пересекающие)
КЕНТОР	К1-6, К5-6, К2-6, К2-3	К1-5, К2-5, К3-6, К4-6
ПОЛИГОН	П0-1, П0-2, П0-3, П0-4	П1-2, П2-3, П2-4, П3-4
АЛМАЛЫ	<b>А1-4, А1-5, А7-4, А7-5</b>	А1-7, А2-9, А3-4, А4-5

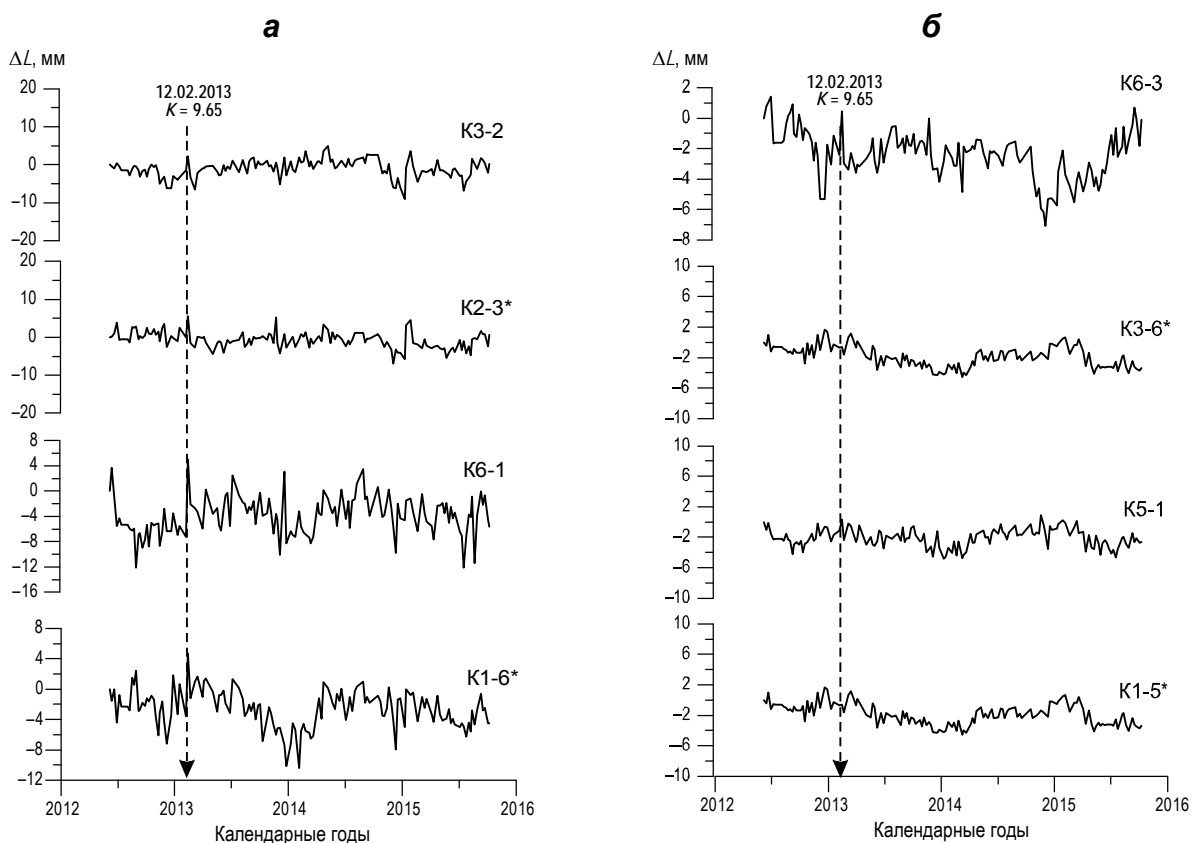
Рассматривались результаты измерений по названным линиям в прямом и обратном направлении, т.е. учитывалось по восемь измерений в каждой группе на трех площадках. Предварительный просмотр показал, что результаты измерений не свободны от ошибок, имеющих, по-видимому, техногенную природу. К этим ошибкам чаще всего относятся внезапные выбросы, идентифицируемые по алгоритмам и программам поиска выбросов [Кобзарь, 2006], а также изменения уровня 0 или полярности, в несколько раз превышающие вариации значений в последовательных точках измерений. В таких случаях вносились поправки, приводящие ошибочные значения к результату предыдущего измерения.

Сеансы нивелирования в пределах площадок проводились всего два раза в год. Было установлено, что величины вертикальных перемещений не превышают первых миллиметров и соизмеримы с ошибками измерений, практически не влияя на длину линий между реперами, в связи с чем в настоящей работе не учитываются. Это не исключает возможного проявления кратковременных вертикальных движений в зонах разломов, как это установлено в [Кузьмин, 2004]. Случаи изменения деформаций поверхности земли вблизи разломных зон перед землетрясениями отмечались неоднократно [Левнев, 1988].

На всех трех названных выше площадках 05.06.2012 г. были начаты регулярные наблюдения, предполагающие проведение измерений примерно один раз в 8 сут. Временной интервал, к которому относятся анализируемые результаты, ограничен датой обработки последних по времени *GPS* данных – 14.10.2015 г. Измерения на площадке ПОЛИГОН выполнены на 11 базовых линиях с длиной от 214 до 1136 м; на площадке КЕНТОР – на 10 с длиной от 680 до 2450 м; на площадке АЛМАЛЫ – на 23 с длиной от 149 до 1750 м. Измерения по всем линиям в каждом сеансе занимали 1 день. Результаты *GPS* измерений представлялись в системе отсчета *EUR4-2008* с усреднением координат за 4–5 сут.

Примеры рядов наблюдений на площадке КЕНТОР приведены на рис. 2 отдельно для линий, включенных в группу I (см. табл. 1) (рис. 2, а: линии К1-6\*, К2-3\* – прямой

ход, К6-1, К3-2 – обратный), и для линий, включенных в группу II (рис. 2, б: линии К1-5\*, К3-6\* – прямой ход, К5-1, К6-3 – обратный). Начало измерений на каждой линии принималось за 0, т.е. исследовались относительные вариации длины каждой линии. При рассмотрении представленных графиков на себя обращает внимание то, что, во-первых, разброс значений для линий, пересекающих разлом (группа I, рис. 2, а), примерно вдвое превышает разброс для линий, разлом не пересекающих (группа II, рис. 2, б), и, во-вторых, в обоих случаях просматривается сезонный ход.



**Рис. 2.** Площадка КЕНТОР. Вариации длины линий относительно ее среднего значения для группы I (а) и группы II (б) при прямом и обратном ходе измерений. Здесь и далее номера линий при прямом ходе отмечены звездочкой; вертикальная стрелка на всех рисунках – момент события 12.02.2013 г.

По данным сейсмического каталога Геофизической службы РАН в рассматриваемый интервал времени в районе, ограниченном координатами  $42.5\text{--}42.75^\circ$  с.ш.,  $74.5\text{--}75.00^\circ$  в.д., произошло пять относительно сильных землетрясений ( $K > 9.5$ ). Практически все землетрясения в пределах Бишкекского полигона происходят на глубинах 5–15 км. Эпицентр события 12.02.2013 г. ( $42.69^\circ$  с.ш.,  $74.865^\circ$  в.д.,  $K=9.65$ ) находился на удалении примерно 2 км от Шамсинского разлома (момент землетрясения отмечен стрелкой на рис. 2). Сеансы измерений на площадке КЕНТОР проведены 07 и 14.02.2013 г. Локальные максимумы на рис. 2, а относятся к измерениям 14.02.2013 г. На не пересекающих разлом линиях из группы II изменений в это время не просматривается (см. рис. 2, б).

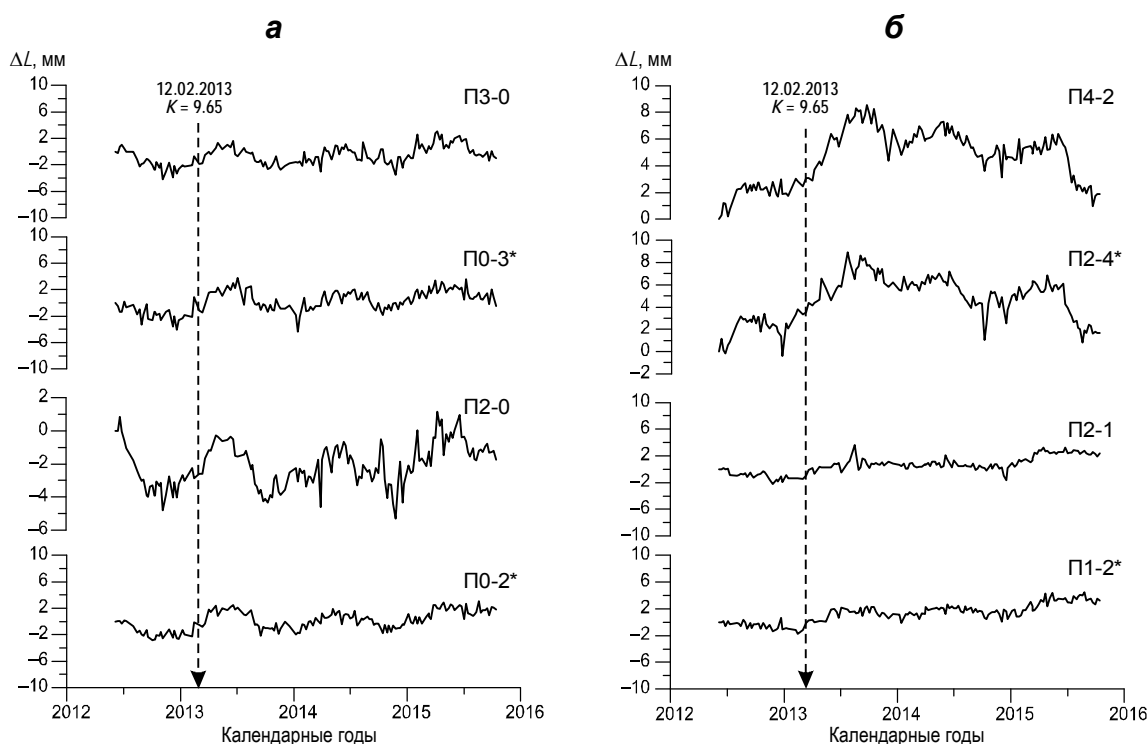
Сеансы измерений при трех других событиях 2013 г. оказались неудачно расположенными во времени относительно моментов сейсмических событий. Так, землетрясение 29.07.2013 г. ( $42.678^\circ$  с.ш.,  $74.815^\circ$  в.д.,  $K=9.62$ ) произошло через 5 сут после одного сеанса измерений (24.07.2013 г.) и за 8 сут до следующего (06.08.2013 г.).

Землетрясение 17.10.2013 г. ( $42.633^\circ$  с.ш.,  $74.975^\circ$  в.д.,  $K=10.59$ ) случилось через 8 сут после сеанса измерений 09.10.2013 г. и за 7 сут до сеанса 24.10.2013 г.

Третье событие (26.12.2013 г.,  $42.616^\circ$  с.ш.,  $74.947^\circ$  в.д.,  $K=9.72$ ) произошло через сутки после одного сеанса и за 14 сут до следующего, проведенного 09.01.2014 г.

Отмеченное относится и к площадкам ПОЛИГОН и АЛМАЛЫ, поскольку сеансы измерений на них сдвинуты относительно измерений на площадке КЕНТОР всего на одни сутки. Только землетрясение 08.04.2015 г. ( $42.541^\circ$  с.ш.,  $74.503^\circ$  в.д.,  $K=10.2$ ) удачно попало по времени между сеансами измерений, но в настоящей работе не мог быть представлен анализ вариаций в сопоставлении с этим событием. Это связано с тем, что очаг события 08.04.2015 г. расположен на значительном ( $\sim 30$  км) расстоянии от площадок и к тому же на момент написания статьи еще не были обработаны результаты *GPS* измерений, необходимые для сопоставления с результатами светодальномерных наблюдений.

Вариации длины линий П0-02 и П0-03 из группы I на площадке ПОЛИГОН при прямом и обратном ходе показаны на рис. 3, а, вариации длины линий из группы II – на рис. 3, б. Сопоставление этих рисунков приводит к выводу, что в отличие от площадки КЕНТОР (см. рис. 2), размах колебаний на линиях разных групп примерно одинаков. Отметим, что эпицентр землетрясения 12.02.2013 г. удален от площадки ПОЛИГОН на 14.3 км, а от площадки КЕНТОР на 8.2 км.

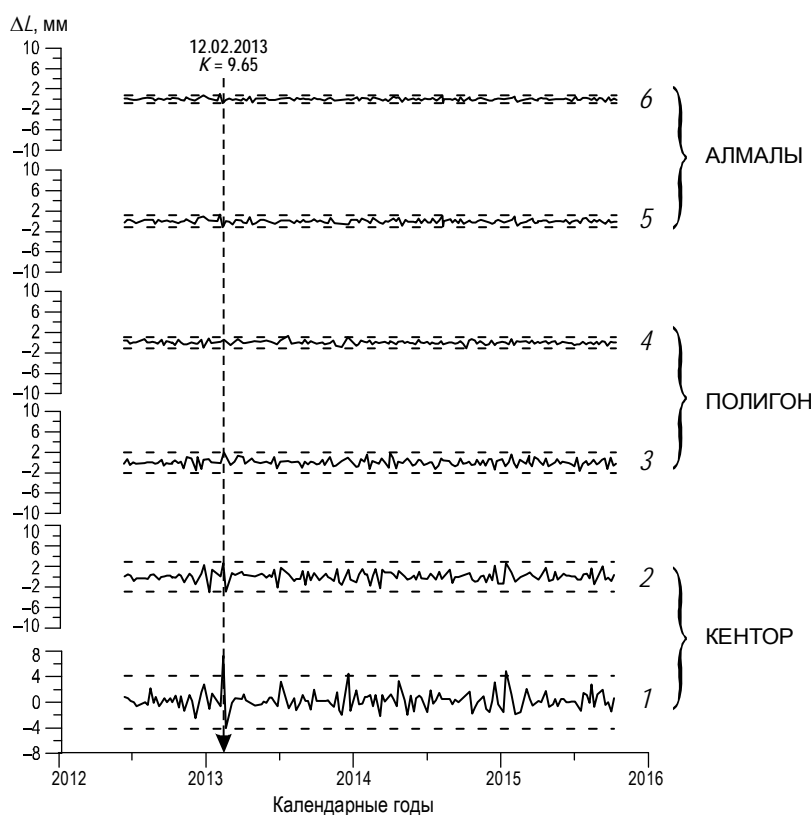


**Рис. 3.** Площадка ПОЛИГОН. Вариации длины линий относительно ее среднего значения для группы I (а) и группы II (б) при прямом и обратном ходе измерений

Визуальный просмотр графиков, приведенных на рис. 2, 3, и анализ вариаций длины всех остальных линий, включая расположенные на площадке АЛМАЛЫ, позволяют считать, что в течение нескольких суток до или после землетрясения 12.02.2013 г. на площадке КЕНТОР линии, пересекающие Шамсинский разлом, удлинились. Это наглядно проявляется в появлении синхронных максимумов на графиках для линий К1-6\*, К6-1, К2-3\*, К3-2 (см. рис. 2, а).

Низкочастотные вариации затрудняют сопоставление данных по разным линиям, в связи с чем для дальнейшего анализа были построены разности последовательных во времени отсчетов, что устранило сезонные тренды.

Осредненную разность по пересекающим Шамсинский разлом линиям К1-6, К5-6, К2-6, К2-3 (группа I) на площадке КЕНТОР (см. рис. 1) при прямом и обратном ходе измерений представляет график 1 на рис. 4. Выделяется аномалия, амплитуда которой превышает три среднеквадратичных отклонения ( $3\sigma$ ). Согласно различным критериям оценки значимости выбросов [Кобзарь, 2006], неслучайность ее появления превышает 0.99. Измерения 14.02.2013 г. показали, что по сравнению с 07.02.2013 г. длина линий в среднем увеличилась на 7.8 мм. При следующем измерении 21.02.2013 г. длина линий уменьшилась на 11.2 мм по сравнению с измерением 14.02.2013 г. При сопоставлении с уровнем фона можно заключить, что продолжительность реакции на событие 12.02.2013 г. не превышала нескольких суток (3–8 сут).



**Рис. 4.** Вариации осредненной разности между последовательными измерениями длины линий, пересекающих (группа I) и не пересекающих (группа II) Шамсинский разлом на площадках КЕНТОР (1, 2), ПОЛИГОН (3, 4) и линий субмеридиональной и субширотной ориентации на площадке АЛМАЛЫ (5, 6). Пунктирные линии – границы  $\pm 3\sigma$

Аналогичные разностные кривые по четырем линиям (8 измерений) были вычислены для площадок ПОЛИГОН и АЛМАЛЫ (графики 3–6 на рис. 4). При рассмотрении полученных графиков значимых аномальных изменений не выявлено. Пунктирными линиями возле соответствующих графиков показаны уровни  $3\sigma$ , по которым видно, что наибольший размах колебаний характерен для площадки КЕНТОР, наименьший – для площадки АЛМАЛЫ. Последнее связано, по-видимому, с тем, что площадка АЛМАЛЫ, как было отмечено выше, не пересекается трассой Шамсинского разлома.

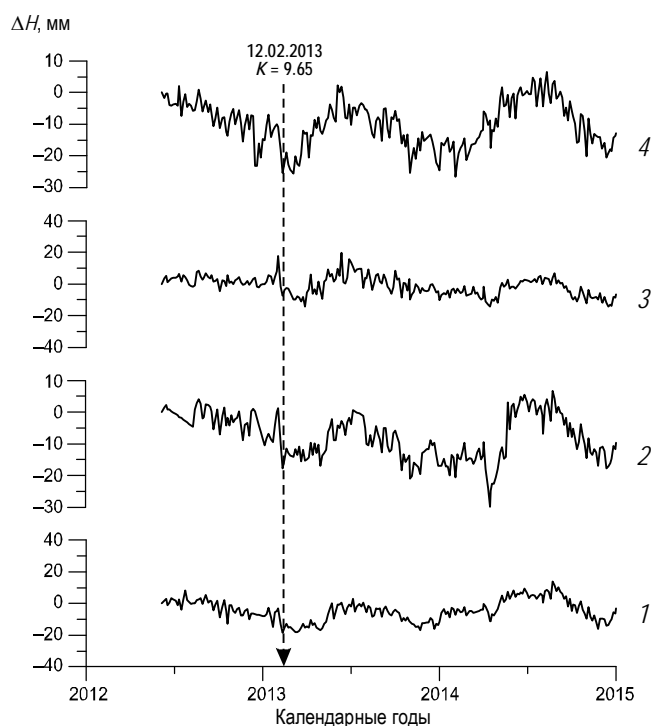
### Вариации движения *GPS* станций

Проведенные на Бишкекском полигоне *GPS* наблюдения позволяют оценить, отмечались ли в период наблюдения светодальномерной аномалии 02–14.02.2013 г. вариации движения *GPS* станций. Три из рассматриваемых станций (см. рис. 1) – *IATA*, *IAT3*, *POL2* – расположены к югу от Шамсинского разлома, одна – *CHUM* – к северу от него (координаты станций и высота над уровнем моря приведены в табл. 2).

**Таблица 2.** Географические координаты и высота над уровнем моря *GPS* станций, расположенных на территории Бишкекского полигона

№	<i>GPS</i> станции	$\varphi$ °с.ш.	$\lambda$ °в.д.	<i>H</i> , м
1	<i>IATA</i>	42.653	74.841	1911.79
2	<i>IAT3</i>	42.660	74.850	1785.57
3	<i>POL2</i>	42.680	74.694	1714.20
4	<i>CHUM</i>	42.998	74.751	716.32

Анализировались *GPS* данные за период с 05.06.2012 г. (дата начала описанных выше светодальномерных наблюдений) по 31.12.2014 г. (более поздние данные не были обработаны на момент написания данной статьи). На станциях *POL2* и *CHUM* за этот интервал времени было проведено 239 сеансов наблюдений; на станциях *IATA* и *IAT3* имелись пропуски некоторых сеансов, заполненные с использованием линейной интерполяции. Вариации смещения станций *IATA* (1), *IAT3* (2), *POL2* (3), *CHUM* (4) по вертикали ( $\Delta H$ ) представлены на рис. 5.



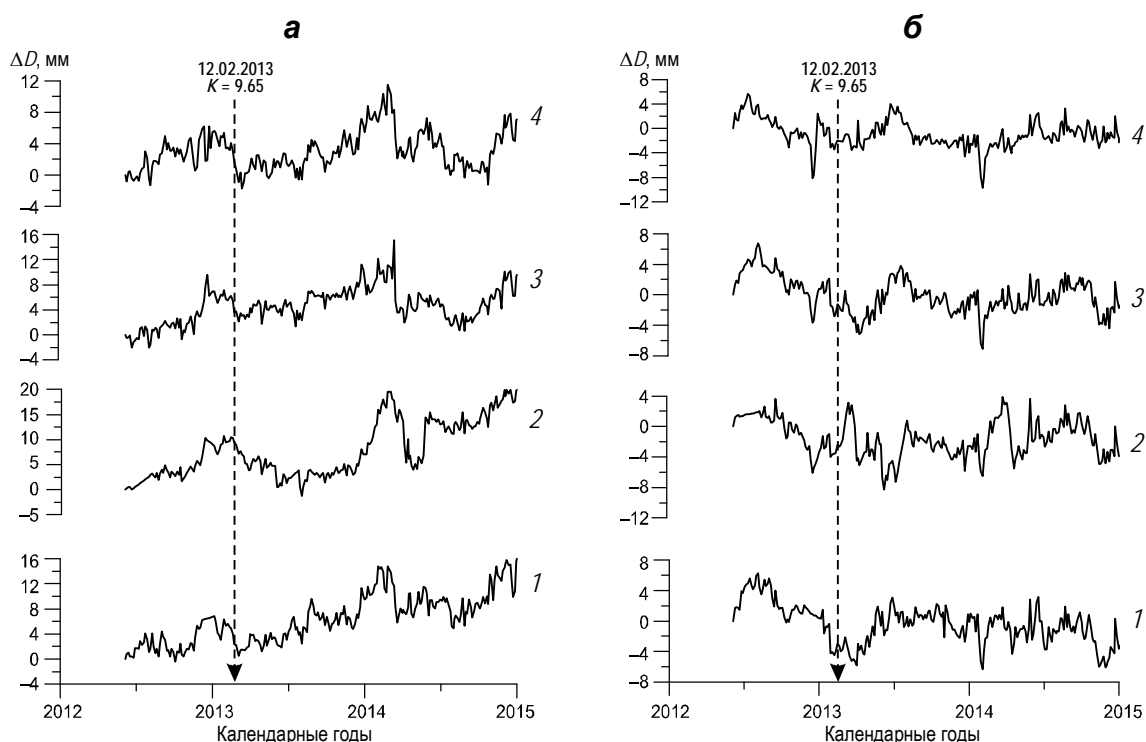
**Рис. 5.** Вариации положения станций *IATA* (1), *IAT3* (2), *POL2* (3), *CHUM* (4) по высоте ( $\Delta H$ ) относительно значения первого измерения

В период 02–11.02.2013 г. на всех станциях отмечается уменьшение высоты на 15–25 мм. Сеанс наблюдений 15.02.2013 г. обнаружил обратное изменение – в сторону



относительного увеличения высоты. Синхронность изменений говорит в пользу того, что наблюдаемые изменения неслучайны.

До некоторой степени результат подтверждается данными, представленными на рис. 6, *а*: на фоне трендового смещения станций на север просматривается уменьшение скорости движения так же во временном интервале 02–11.02.13 гг., т.е. перед землетрясением, момент которого отмечен на рисунках стрелками. На компонентах восток–запад (рис. 6, *б*) изменения в этом интервале не выходят за уровень шума.



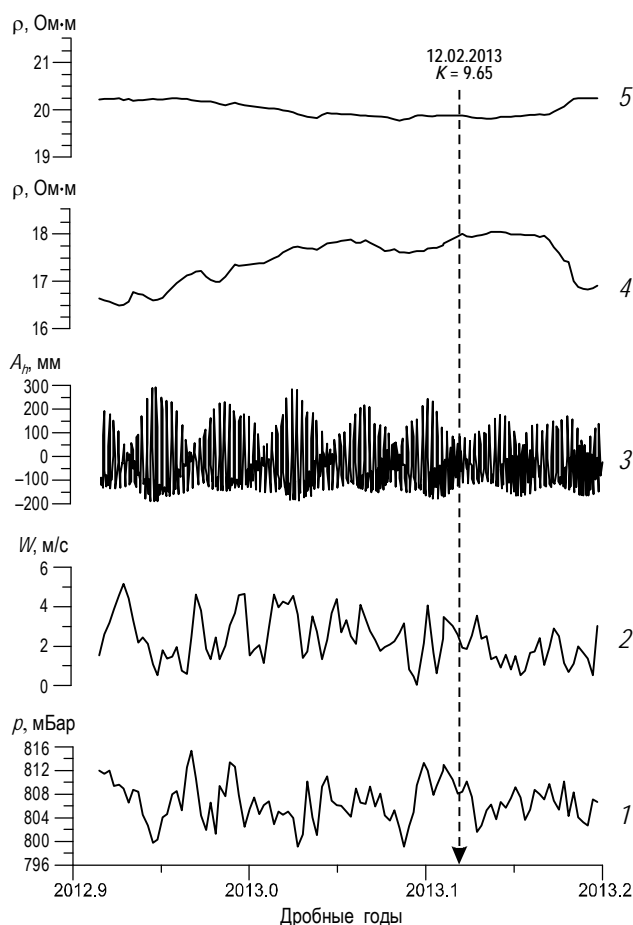
**Рис. 6.** Вариации смещения станций *IATA* (1), *IAT3* (2), *POL2* (3), *CHUM* (4) в направлении “север–юг” (*а*) и “восток–запад” (*б*)

### Интерпретация данных

Как уже отмечалось, станции *IATA*, *IAT3* и *POL2* находятся к югу от Шамсинского разлома; станция *CHUM* – к северу от него (см. рис. 1). Станции разнесены друг от друга на несколько километров. Уменьшение высоты (см. рис. 5) и замедление движения на восток (см. рис. 6, *а*) наблюдалось одновременно для всех *GPS* станций, при этом разница в амплитудах смещения не превышала ошибки измерений. Это свидетельствует о том, что синхронные аномальные движения одинаково проявились в исследуемом районе Бишкекского геодинамического полигона.

С чем может быть связано такое явление и, прежде всего, опускание территории в период со 2 по 11 февраля 2013 г.? Одна из возможных причин – аномально высокое атмосферное давление. Это предположение было проверено с привлечением данных метеорологической станции, находящейся не далее 650 м от станций *IATA* и *IAT3*. График 1, приводимый на рис. 7, демонстрирует вариации давления за период 1.12.2012–14.03.2013 гг.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> В целом низкие значения атмосферного давления объясняются местоположением метеостанции на высоте ~1900 м над уровнем моря.



**Рис. 7.** Вариации атмосферного давления  $p$ , мБар (1), скорости ветра  $W$ , м/с (2), вертикальной составляющей земного прилива  $A_h$ , мм (3) и определенного по данным зондирования на станции ТВ удельного электрического сопротивления в земной коре  $\rho$ , Ом·м (4 – компонента В–З, 5 – С–Ю). Стрелкой отмечена дата землетрясения 12.02.2013 г.

Аномальных изменений давления в интересующий нас период до и после землетрясения 12.02.2013 г. не обнаруживается. На графике 2 рис. 7 представлены вариации скорости ветра; можно видеть, что и этот параметр свидетельствует о спокойной метеорологической обстановке. Заметим, что температура воздуха была устойчивой в диапазоне от  $-2$  до  $-5$  °С.

Второй природный фактор, влияющий на деформации поверхности, – земные приливы. Были рассчитаны вариации вертикальной и горизонтальных компонент прилива с использованием программы *TIDEN* [Wenzel, 1995]. Вертикальные деформации прилива могут вызывать временное опускание территории, но на графике их вариаций (график 3 на рис. 7) каких-либо аномальных особенностей в период землетрясения не наблюдается.

Обратимся к результатам глубинного электромагнитного зондирования, выполненного методом становления поля. Вариации электрического сопротивления  $\rho$  измеряются на сети станций, где установлены взаимно перпендикулярные электрические диполи, принимающие электромагнитные сигналы от передающего диполя, расположенного в центральной части геодинамического полигона. Начиная с 1982 г. электромагнитные наблюдения на Бишкекском полигоне проводятся ежедневно, благодаря чему накоплен большой опыт их применения [Трапезников, Вольхин, Брагин, 1986; Трапезников и др., 1989]. В настоящее время используется метод становления поля

в дальней зоне. Режимные наблюдения выполняются на разных временных интервалах становления переходной характеристики среды; точность измерения вариаций  $\rho$  не хуже 1 %. Одна из приемных станций *TB* расположена внутри площадки КЕНТОР на расстоянии 5 км от Шамсинского разлома (см. рис. 1, станция *TB*).

Измерения позволяют оценить вариации  $\rho$  на разных глубинах. На станции *TB* они практически идентичны в диапазоне глубин от 1 до 15 км при коэффициентах корреляции >95 %. На графиках 4 и 5 рис. 7 показаны вариации  $\rho$  на глубине около 10 км в компонентах С-Ю и В-З; анализ проводился на временах становления поля 0.86 с. Ранее [Фридман и др., 2005] было установлено, что в некоторых случаях вариации  $\rho$  на этой станции значимо коррелированы с деформациями земной коры, прослеженными по *GPS* данным. В нашем случае в период землетрясения 12.02.2013 г. аномальных изменений не отмечено. Электросопротивление пород земной коры зависит от водонасыщенности трещин и внутривещного давления. Отсутствие значимых изменений  $\rho$  в период 2–11 февраля 2013 г. говорит о том, что отмеченное в вариациях *GPS* опускание земной поверхности не сказалось на этих свойствах пород, т.е. массив деформировался как целое.

Вышеприведенные данные (см. рис. 7) свидетельствуют, что вариации атмосферного давления, амплитуды земного прилива и электрического сопротивления горных пород не были причиной деформаций, выявленных методом *GPS*. В связи с этим не исключается прохождение гипотетической деформационной волны. Прояснить этот вопрос мог бы анализ деформаций на смежных с Бишкекским полигоном территориях, однако регулярных наблюдений с дискретностью порядка недели или меньше на них не проводилось.

Возвращаясь к рис. 2 и графику 1 на рис. 4, отметим, что изменение длины линий на площадке КЕНТОР в интервале между сеансами измерений 07 и 14.02.2013 г. выпадают из представления о равномерных деформациях поверхности Бишкекского полигона по *GPS* данным. Высоко значимые изменения обнаружены только на линиях, пересекающих трассу Шамсинского разлома. Эти субмеридионально ориентированные линии расположены почти перпендикулярно трассе разлома вблизи площадки КЕНТОР. На линиях того же направления на площадке АЛМАЛЫ, не пересекающих разлом, аномальных изменений не обнаружено (графики 5, 6 на рис. 4). Логично допустить, что удлинение линий на площадке КЕНТОР вызвано локальной деформацией растяжения в зоне разлома.

Можно считать твердо установленным фактом то, что горизонтальные и вертикальные деформации в зонах разломов во много раз превышают деформации в окружающем массиве горных пород [Кузьмин, 2004], т.е. проявляется локализация деформаций, что обусловлено разной жесткостью материала разлома и массива пород.

Величина нормальной жесткости разных разломных зон была оценена в работе [Спивак, 2011] как  $k_n = d\sigma_n/dW_n$  (МПа/мм), где  $d\sigma_n$  – нормальное механическое (тектоническое) напряжение, действующее на берегах разлома;  $dW_n$  – нормальное перемещение берегов. В той же работе было показано, что жесткость меняется в зависимости от длины разломной зоны  $L$  в соответствии с формулой  $k_n = 3/L^{0.55}$ .

Предполагая, что длина относительно прямолинейного участка Шамсинского разлома вблизи площадки КЕНТОР составляет 10 км, получим оценку его нормальной жесткости  $k_n \approx 0.85$  МПа/мм. Оценки величины жесткости выполнены при сейсмических нагрузках на разломные зоны. Однако в работе [Кочарян, Спивак, 2003] показано, что жесткость мало меняется при существенно разном периоде действующей перпендикулярно разлому динамической нагрузки. Это дает основания использовать вышеприведенные уравнения при оценочных расчетах в наших измерениях, проводимых с периодичностью в несколько суток.

Разлом, заполненный материалом, относительно более мягким по сравнению с породами окружающего массива, можно уподобить мембране. Устройства такого типа – диски, заполненные жидкостью и помещенные в щели, – позволяли измерять вариации перпендикулярного к плоскости диска напряжения в горном массиве [Шпоркин, Соболев, 1981, 1983]. Относительные смещения стенок мембраны при отношении ее диаметра к толщине  $D/W > 20$  прямо пропорциональны изменению перпендикулярного к плоскости мембраны механического напряжения. Это дает возможность оценивать вариации действующих на разлом тектонических напряжений по данным об изменении ширины разломной зоны.

Выше было показано (см. рис. 2, 6), что за время между 2 и 14 февраля 2013 г. длина пересекающих Шамсинский разлом линий дальномерных измерений на площадке КЕНТОР увеличилась на 7.8 мм. Всю деформацию можно отнести к зоне разлома, заполненного материалом, более мягким по сравнению с окружающим массивом. С учетом пояснений в двух предыдущих абзацах приходим к следующему выводу. В период землетрясения 12.02.2013 г. ( $K=9.65$ ), по-видимому, имела место флуктуация действующих на Шамсинский разлом нормальных напряжений  $d\sigma_n = k_n dW_n = 6.6$  МПа. С учетом того, что вышеприведенные формулы жесткости разломов получены по эмпирическим данным и не могут быть абсолютно точными, в нашем случае примем  $d\sigma_n \approx 7$  МПа.

Мы не можем сказать, когда произошла подвижка в зоне Шамсинского разлома – до или после момента землетрясения 12.02.2013 г., так как последовательные сеансы дальномерных измерений на площадке КЕНТОР были проведены 07 и 14.02.2013 г. Но мы знаем, что аномальное изменение скорости движения верхних слоев земной коры на Бишкекском полигоне отмечены по *GPS* данным в период между 7 и 11 февраля, т.е. до момента землетрясения, произошедшего 12 февраля.

Механизмы очагов землетрясений исследуются в исследуемом регионе регулярно [Сычева, Юнга, 2011]. Из механизма очага землетрясения 12.02.2013 г. (см. рис. 1) следует, что ось максимального сжатия была ориентирована субмеридионально ( $174^\circ$ ) и имела угол падения, близкий к горизонтали ( $3^\circ$ ). Ось максимальных растягивающих напряжений была ориентирована в субширотном направлении ( $265^\circ$ ) при небольшим угле падения ( $11^\circ$ ). Соответственно, обе возможные плоскости подвижки были направлены примерно под углом  $50^\circ$  к трассе Шамсинского разлома и имели субвертикальное падение.

Динамические параметры землетрясения оценивались по записям станций, расположенных вблизи очага ( $\leq 60$  км), с использованием методики, изложенной в [Сычева, Богомолов, 2014]. С учетом погрешностей определения энергии и ряда динамических характеристик примем следующие параметры рассматриваемого землетрясения: энергетический класс –  $K \approx 9.5$ , сейсмический момент –  $M_0 \approx 4^{12}$  Дж·м, длина подвижки –  $U < 3$  мм, сброшенное напряжение –  $\sigma \approx 0.6$  МПа. Можно с большой долей уверенности предположить, что такое землетрясение не могло вызвать расширение Шамсинского разлома на 7.8 мм и изменение субгоризонтальных напряжений на его бортах в 6.5 МПа. Следовательно, более вероятно, что изменение геодинамической обстановки способствовало возникновению землетрясения, а не наоборот.

### Выводы

Регистрация комплекса геофизических параметров в ряде пунктов Бишкекского полигона Научной станции РАН позволила оценить геодинамическую обстановку в период местного землетрясения энергетического класса  $K=10$ , произошедшего 12.02.2013 г.

По данным *GPS* наблюдений за несколько суток до землетрясения на территории полигона отмечено опускание земной поверхности с амплитудой  $\sim 20$  мм.

По результатам светодальномерных измерений в течение нескольких суток в период землетрясения установлено увеличение примерно на 8 мм ширины тектонического разлома, расположенного в 2 км от эпицентра события. Такое изменение ширины разлома соответствует изменению действующих тектонических напряжений в его области примерно на 7 МПа. Очевидно, что установленное изменение геодинамической обстановки могло способствовать возникновению местного землетрясения.

### Литература

- Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 313 с.
- Кочарян Г.Г., Спивак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: ИКЦ Академкнига, 2003. 423 с.
- 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.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика разломных зон // *Физика Земли*. 2004. № 10. С.95–111.
- Певнев А.К.* Прогноз землетрясений – геодезические аспекты проблемы // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1988. № 12. С.88–98.
- Рыбин А.К.* Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических зондирований. М.: Научный мир, 2011. 272 с.
- Рыбин А.К., Пушкарев П.Ю., Паленов А.Ю., Иванова К.А., Мансуров А.Н., Матюков В.Е.* Новые геофизические данные о глубинной структуре межгорных впадин Тянь-Шаня // *Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология*. 2015. № 1. С.63–69.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Акатова К.Н., Гитис В.Г., Дерендяев А.Б., Брагин В.Д., Сычева Н.А., Кузиков С.И.* Динамика взаимодействия полей сейсмичности и деформаций земной поверхности (Бишкекский геодинамический полигон) // *Физика Земли*. 2010. № 10. С.15–37.
- Спивак А.А.* Оценка жесткости разломных зон земной коры на основе сейсмических данных // *Физика Земли*. 2011. № 7. С.44–53.
- Сычев В.Н., Авагимов А.А., Богомолов Л.М., Зейгарник В.А., Сычева Н.А.* О триггерном влиянии электромагнитных импульсов на слабую сейсмичность в связи с проблемой разрядки избыточных тектонических напряжений // *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли*. Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2008. С.179–188.
- Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Рыбин А.К., Сычева Н.А.* Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона // *Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Всероссийского семинара-совещания (г. Москва, 22–24 июня 2010 г.) / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна*. М.: Геос, 2010. С.316–326.
- Сычева Н.А., Богомолов Л.М.* Падение напряжения в очагах среднемагнитудных землетрясений в Северном Тянь-Шане // *Физика Земли*. 2014. № 3. С.142–153.
- Сычева Н.А., Юнга С.Л.* Обновленные материалы по механизмам очагов и сейсмотектоническим деформациям земной коры Тянь-Шаня // *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Труды Всероссийской конференции (Новосибирск, 3–6 октября 2011 г.)*. Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2011. Т. 1. С.151–156.
- Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамедеева В.А.* Сейсмотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) // *Физика Земли*. 2005. № 11. С.62–78.
- Трапезников Ю.А., Вольхин А.М., Брагин В.Д.* О первых результатах режимных малоглубинных электрометрических наблюдений на Фрунзенском прогностическом полигоне (полигон ИВТАН-2) // *Прогноз землетрясений*. 1986. № 7. С.107–115.
- Трапезников Ю.А., Вольхин А.М., Щелочков Г.Г., Брагин В.Д.* Основные результаты электромагнитных исследований по прогнозу землетрясений на полигоне ИВТАН-2 // *Прогноз землетрясений*. 1989. № 11. С.264–274.
- Шпоркин М.И., Соболев Г.А.* Датчик для измерения напряжений в горном массиве: Авт. свид. № 825946. 1981.

*Шпоркин М.И., Соболев Г.А.* Способ измерения напряжения горных пород: Авт. свид. № 1038901. 1983.

*Фридман А.М., Богомолов Л.М., Брагин В.Д., Зейгарник В.А., Zubovich A.B., Макаров В.И., Поляченко Е.В., Соболев Г.А., Щелочков Г.Г.* О связи электропроводности и современных движений земной коры // Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Ред. В.И. Макаров. М.: Научный мир, 2005. С.219–223.

*Wenzel H.-G.* The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30 // *Marees Terrestres. Bulletin d'Informations.* 1996. N 124. P.9425–9439.

#### *Сведения об авторах*

**СОБОЛЕВ Геннадий Александрович** – доктор физико-математических наук, член-корр. РАН, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-91-41. E-mail: sobolev@ifz.ru

**КУЗИКОВ Сергей Иванович** – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Научная станция РАН. 720049, Республика Киргизия, Бишкек-49. Тел.: +996(312) 61-31-40. E-mail: ksi@gdirc.ru

**БРАГИН Виталий Дмитриевич** – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Научная станция РАН. 720049, Республика Киргизия, Бишкек-49. Тел.: +996(312) 61-31-40. E-mail: bragin@gdirc.ru

**СЫЧЕВА Найля Абдуллоевна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Научная станция РАН. 720049, Республика Киргизия, Бишкек-49. Тел.: +996(312)61-31-40. E-mail: nelya@gdirc.ru

## **STRAIN VARIATIONS AT THE GEODYNAMIC TEST SITE IN THE TIEN SHAN AND THE LOCAL EARTHQUAKE OF 12.02.2013**

G.A. Sobolev<sup>1</sup>, S.I. Kuzikov<sup>2</sup>, V.D. Bragin<sup>2</sup>, N.A. Sycheva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Research Station, Russian Academy of Sciences, Bishkek*

**Abstract.** The results of complex geophysical observations conducted at the Bishkek geodynamic test site, the Tien Shan, are presented. The seismic network KNET operating at the test site enables the recording of earthquake with the minimum energetic class  $K=7$  and determining their focal mechanisms.

The observations of deformations of the Earth's crust were carried out for many years at the Tien-Shan territory and adjacent regions using the methods of satellite geodesy. The weekly measurements were organized at three sites with linear sizes up to 3 km in 2012; their first results are discussed. The special attention is drawn to strain recording in the fault zones, which allows the estimation of variations observed in tectonic stresses.

Variations in several parameters: distances between different observation points, surface strains using GPS data, and electrical resistivity at various depths were studied and compared with the seismicity and focal mechanisms of earthquakes. The analysis of the data provided the possibility to estimate the geodynamic situation during the local earthquake of 12.02.2013, energetic class  $K=10$ . The depression of the Bishkek geodynamic test site at ~20 mm was revealed several days before the earthquake. The width of the nearby tectonic fault increased up to 8 mm, which corresponds to the variation in effective tectonic stress by about 7 MPa. It is concluded that the changes in geodynamic conditions contribute to the occurrence of the local earthquake.

**Keywords:** geodynamics, seismicity, electrical resistivity, earthquake, displacements, deformation, stress.

## References

- Fridman A.M., Bogomolov L.M., Bragin V.D., Zeygarnik V.A., Zubovich A.V., Makarov V.I., Polyachenko E.V., Sobolev G.A., and Schelochkov G.G., About the relationship between electrical conductivity and the modern movements of the earth's crust, *Sovremennaya geodinamika oblastey vnutrikontinentalnogo kollizionnogo gorooobrazovaniya (Tsentralnaya Aziya)* (Modern geodynamics of areas of inland collision orogeny (Central Asia), Moscow: Nauchnyi mir, 2005, pp. 219-223.
- Kobzar A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika* (Applied mathematical statistics), Moscow: FIZMATLIT, 2006.
- Kocharyan G.G. and Spivak A.A. *Dinamika deformirovaniya blochnykh massivov gornykh porod* (The dynamics of rock deformation), Moscow: Akademkniga, 2003.
- Kuzikov S.I. and Mukhamediev Sh.A., Structure of the Present-Day Velocity Field of the Crust in the Area of the Central-Asian GPS Network, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2010, vol. 46, no. 7, pp. 584-601.
- Kuzmin Yu.O. Recent geodynamics of fault zones, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2004, no. 7, pp. 95-111.
- Pevnev A.K. Earthquake prediction. Geophysical aspects of the problem. *Izv. Phys. Solid Earth*, 1988, no. 12, pp. 88-98.
- Rybin A.K., *Glubinnoe stroenie i sovremennaya geodinamika Tsentralnogo Tyan-Shanya po rezul'tatam magnitotelluricheskikh zondirovaniy* (Deep structure and modern geodynamics of the Central Tien Shan according to the results of magnetotelluric sounding), Moscow: Nauchnyi mir, 2011.
- Rybin A.K., Pushkarev P.Yu., Palenov A.Y., Ivanova K.A., Mansurov A.N., and Matyukov V.E. New geophysical data on the depth structure of the Tien Shan intermountain depressions, *Moscow Univ. Geol. Bull.*, 2015, vol. 70, no.1, pp. 62-68.
- Shporkin M.I. and Sobolev G.A. *The sensor of stress measurements in rock massive*, Patent # 825946, 1981.
- Shporkin M.I. and Sobolev G.A. *Method for stress measurements in rock massive*, Patent # 1038901, 1983.
- Sobolev G.A., Zakrzhevskaya N.A., Akatova K.N., Gitis V.G., Derendyaev A.B., Bragin V.D., Sycheva N.A., and Kuzikov S.I. Dynamics of Interaction between Fields of Seismicity and Surface Deformations (Bishkek Geodynamic Test Area), *Izv. Phys. Solid Earth*, 2010, vol. 46, no. 10, pp. 817-838.
- Spivak A.A. Rigidity of the fault zones in the Earth's crust estimated from seismic data, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2011, vol. 47, no. 7, pp. 600-609.
- Sychev V.N., Avagimov A.A., Bogomolov L.M., Zeygarnik V.A., and Sycheva N.A. About trigger influence of electromagnetic pulses on weak seismicity, in connection with the problem of discharge of excessive tectonic stresses, *Geodinamika i napryazhennoe sostoyanie nedr Zemli* (Geodynamics and stress state of the Earth), Novosibirsk: Institut gornogo dela SB RAS, 2008, pp. 179-188.
- Sychev V.N., Bogomolov L.M., Rybin A.K., and Sycheva N.A. The influence of electromagnetic soundings of the crust on the seismic regime of the territory of Bishkek geodynamic test site, *Trigernyye efekty v geosistemakh* (Trigger effects in geosystems), Moscow: Geos, 2010, pp. 316-326.
- Sycheva N.A. and Yunga S.L. An updated materials on focal mechanisms and seismotectonic deformations of the Earth's crust of the Tien Shan, *Geodinamika i napryazhennoe sostoyanie nedr Zemli* (Geodynamics and stress state of the Earth), Novosibirsk: Institut gornogo dela SB RAS, 2008, pp. 151-156.
- Sycheva N.A. and Bogomolov L.M. Stress drop in the sources of intermediate-magnitude earthquakes in Northern Tien Shan, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 415-426.
- Sycheva N.A., Yunga S.L., Bogomolov L.M., and Mukhamadeeva V.A. Determination of seismotectonic crustal strains in the North Tien Shan using focal mechanisms from data of the KNET digital seismic network, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2005, vol. 41, no. 11, pp. 916-930.
- Trapeznikov Yu.A., Volykhin A.M., and Bragin V.D. About the first results of shallow electrometric observations on the Frunze prognostic site IVTAN-2, *Prognoz zemletryaseni* (Earthquake forecast), 1986, no. 7, pp. 107-115.
- Trapeznikov Yu.A., Volykhin A.M., Schelochkov G.G., and Bragin V.D. The main results of electromagnetic studies on earthquake prediction at the IVTAN-2 site), *Prognoz zemletryaseni* (Earthquake forecast), 1986, no. 11, pp. 264-274.
- Wenzel H.-G. The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30, *Marees Terrestres. Bulletin d'Informations*, 1996, no. 124, pp. 9425-9439.