

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК в г. БИШКЕКЕ**

УДК 551.240+531.1

№ гос. регистрации 0155-2014-0002

Инв. № 02/16

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор НС РАН в г. Бишкеке

д-р физ.-мат. наук



А.К. Рыбин

«20» декабря 2016 г.



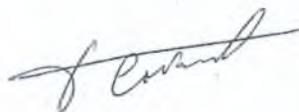
**ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ**

(годовой за 2016 г.)

Раздел 9 «Науки о Земле»:  
Подраздел 128 «Физические поля, внутреннее строение Земли  
и глубинные геодинамические процессы»

Руководитель темы:

член-корреспондент РАН



Г.А. Соболев

Бишкек 2016 г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Зав. лаб. изучения современных движений земной коры методами космической геодезии (LGPS), кандидат физ.-мат. наук

подпись

Кузиков С.И. (все разделы)

Старший научный сотрудник LGPS, к.ф.-м.н.

подпись

Сычева Н.А. (2.3)

Младший научный сотрудник LGPS

подпись

Саламатина Ю.М. (2.1, 3.2, 4.1)

Руководитель Группы ГСДН LGPS

подпись

Бакка Б.Н. (1, 4)

Техник ГСДН LGPS

подпись

Прохоров О.А. (2.1, 2.2)

Младший научный сотрудник лаборатории глубинных магнитотеллурических исследований (ЛГМИ)

подпись

Мансуров А.Н. (2.3)

Отчет утвержден на заседании Ученого совета ИС РАН (Протокол № 7 от 20 декабря 2016 г.)

Ученый секретарь ИС РАН

О.Б. Забиякова



## **Реферат**

Отчет содержит 85 страниц, 56 рисунков, 13 таблиц и список использованных источников, включающий 50 наименований.

### **ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ**

**Объект исследования** – территория Центрально-Азиатской GPS сети, где проводятся многолетние космогеодезические измерения и сопряженные с ними геолого-геофизические исследования. Более детально рассматривается территория Киргизии, где регулярно проводятся разномасштабные GPS, линейно-угловые и нивелировочные измерения.

**Цель работы** – изучение особенностей и выявление закономерностей, построение моделей распределения современных движений земной коры в Центрально-Азиатском регионе на основе данных геодезических измерений и сопряженных с ними других геолого-геофизических работ.

**Методы и методология проведения работы** – в основном это технология глобального позиционирования (GPS), применение которой адаптировано к получению высокоточных координат. Помимо этого, используются и традиционные приемы наземной геодезии – линейно-угловые и нивелировочные измерения. Применение методов космической и наземной геодезии направлены на исследование параметров движения приповерхностной части земной коры в Центрально-Азиатском регионе. Методика многолетних измерений на основе GPS в сочетании с программным пакетом GAMIT/GLOBK позволяет получить временные ряды координат и усредненные линейные скорости с точностью до первых миллиметров для обширных районов исследования.

На территории Киргизии ежегодно проводятся полевые измерения GPS пунктов локальной и региональной сетей. Производится сбор данных с 17 перманентных GPS станций (Киргизия, Казахстан, Таджикистан). На детальных (2-4 км<sup>2</sup>) геодезических площадках осуществляется комплекс режимных измерений и опытно-методические работы с использованием средств GPS, наземной геодезии и других геофизических методов. Линейно-угловые и нивелировочные измерения осуществляются с миллиметровой точностью на отдельных базовых линиях и сегментах, не превышающих по длине 3 километров.

В качестве вспомогательных, но крайне необходимых методов работ, следует отнести организацию баз геодезических данных, благодаря которым осуществляется структурирование, поддержка и фильтрация огромного объема информации за много лет наблюдений. Кроме того, разрабатываются алгоритмы и создаются программы для верификации, фильтрации-коррекции и обработки геодезических данных в максимально возможном автоматическом режиме. Для корректного анализ данных полевых наблюдений осуществляется разработка количественных

методов исследования геодезических данных и сравнение их с другой геолого-геофизической информацией.

Из опыта прошлогодних исследований известно, что наибольшая корреляция геодезических данных отмечается при сравнении с данными сейсмологических наблюдений. В частности, характер распределения деформационных параметров в плане имеет высокую степень сходства для исследуемой территории. В этом направлении нами проводятся работы по изучению пространственного распределения землетрясений, фокальных механизмов очагов, сейсмотектонические деформации, динамических параметров и кинематических характеристик.

#### **Основные результаты:**

1. В июле 2016 г было установлено 6 новых GPS пунктов в районе гор Джумгал-Тоо и Кочкорской впадины, полностью восстановлено 2 пункта в районе южного побережья оз. Иссык-Куль.
2. За летний сезон текущего года на территории Киргизии отмерено 113 региональных пунктов, из которых на 8 пунктах измерены по 3 марки. С учетом декабря 2016 г произведено 4 цикла опроса 36 пунктов локальной Бишкекской GPS сети и 10 фундаментальных пунктов геодезических площадок. Продолжился процесс сбора информации с 13 станций международной перманентной GPS сети и с 4-х перманентных станций площадки Алмалы.
3. Проведен цикл обработки данных GPS измерений за 1994-2015 гг. на территории Центрально-Азиатской сети на основе GAMIT/GLOBK, получен набор из 571 вектора скорости с оценками ошибок  $< 2$  мм/год в системе отсчета EURA 2008. Построены карты векторов скорости для Центрально-Азиатской GPS сети, для Тянь-Шаня, для Бишкекской локальной GPS сети.
4. Проведено определение динамических параметров для 85 землетрясений с энергетическим классом  $K=9.5-13.7$ , которые произошли на территории Северного Тянь-Шаня за 1998-2012 годы. Сопоставлены динамические параметры: радиус Брюна, скалярный сейсмический момент, падение напряжений в зависимости от магнитуд событий. Выделены зоны с наибольшим падением напряжений. Установлено, что события взбросового типа вносят значительный вклад в уровень падения напряжений для зон с геодинамическим режимом горизонтального сжатия. При сравнении уровня падения напряжений с GPS-данными выделена область максимальных значений изменения площади, в которой отсутствуют землетрясения с уровнем падения напряжений  $\Delta\sigma > 10$  бар.
5. База данных GPS наблюдений дополнена поступившей информацией в 2016 г и находится в актуальном состоянии. Предложен усовершенствованный алгоритм уравнивания данных прямых и обратных линейно-угловых наблюдений, основанный на избыточных данных одного цикла измерений и учитывающий средние измерения параметров по временному ряду.

6. На 3-х геодезических площадках Бишкекского геодинамического полигона в 2016 г продолжены линейно-угловые, GPS и нивелировочные наблюдения за сегментами активных разломов. Дополнены ряды длин и угловых величин для базовых линий площадок. Построены временные ряды длин базовых линий всех площадок. Выявлены общие аномальные деформационные проявления как для отдельных, так и для всех площадок. На основе GPS данных за 2012-2015 гг. наблюдений построены временные ряды и карты векторов скорости. Установлены количественные и кинематические особенности долговременных движений для реперов площадок относительно разрывных нарушений.

**Перечень ключевых слов:** GPS, геодезия, вектор скорости, современные движения, землетрясения, динамические параметры, Тянь-Шань.

## СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения и сокращения.....	7
Введение.....	8
1 Исследование современных движений земной коры на основе измерений GPS сети Центральной Азии .....	10
1.1 Космогеодезические наблюдения на территории Центральной Азии.....	10
1.2 Установка новых и восстановление региональных GPS пунктов в Киргизстане .....	12
1.3 Измерения региональных GPS пунктов в Киргизстане .....	15
1.4 Измерения в пределах Бишкекской локальной GPS сети.....	16
1.5 Измерения на перманентных станциях Центрально-Азиатской GPS сети. ....	18
2 Изучение пространственно-временной структуры поля скорости движений на территории Центральной Азии, сопоставление с геолого-геофизическими данными .....	20
2.1 Порядок обработки данных GPS измерений .....	20
2.2 Векторы скорости на разных масштабных уровнях в пределах Центрально-Азиатской GPS сети.....	21
2.3 Закономерности падения напряжений при землетрясениях Северного Тянь-Шаня .....	24
2.3.1 Данные для исследования.....	25
2.3.2 Основы и методика расчета динамических параметров землетрясений .....	26
2.3.3 Результаты расчета динамических параметров землетрясений.....	29
2.3.4 Сравнение деформационного поля изменения площади по данным GPS и падение напряжений по сейсмологическим наблюдениям.....	38
Выводы .....	38
3 Разработка программных средств систематизации и методов обработки данных геодезических наблюдений для геодинамического анализа.....	40
3.1 Алгоритм и программа объединения временных рядов координат GPS марок одного пункта .....	41
3.2 Разработка алгоритма уравнивания данных прямых и обратных линейно-угловых измерений.....	42
4 Изучение режима деформации на сегментах разломов по данным комплексных геодезических наблюдений на детальных площадках .....	48
4.1 Данные линейно-угловых наблюдений .....	49
4.2 Нивелирование геодезических площадок.....	67
4.3 Данные GPS измерений на детальных площадках.....	71
4.4 Особенности проявления многолетних деформационных процессов на площадке ALMALY по данным GPS-наблюдений.....	75
Заключение.....	80
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	82

## Определения, обозначения и сокращения

**НС РАН** – сокращенное название учреждения: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке.

**GPS** – инициальная аббревиатура от **Global Positioning System**, система глобального позиционирования, спутниковая система навигации, обеспечивающая измерение расстояния, времени и определяющая местоположение в мировой системе координат WGS 84.

**IGPS** – сокращенное обозначение "Лаборатории изучения современных движений земной коры методами космической геодезии" в составе НС РАН.

**KNET** – сложносокращённое слово от **Kyrgyz Seismic Network**, Кыргызская сейсмическая сеть. Первая региональная широкополосная телеметрическая сеть для непрерывной регистрации сейсмических сигналов в Центральном Тянь-Шане.

**ЦА** – инициальная аббревиатура от Центральная Азия, Центрально-Азиатская (GPS сеть).

**СДЗК** – инициальная аббревиатура от "современные движения земной коры".

**НИР** – инициальная аббревиатура от "научно-исследовательские работы".

**ЗЛТ** – сокращение от "землетрясение".

**ЛУИ** – инициальная аббревиатура от "линейно-угловые измерения".

**БЛ** – инициальная аббревиатура от "базовая(-ые) линия(-и)".

## Введение

Система глобального позиционирования (GPS) основывается на группировке искусственных спутников Земли (>30), каждый из которых имеет фиксированную траекторию орбиты на высоте ~20200 км от поверхности Земли и ~ 12 часовой период обращения. Система GPS включает в себя и наземный комплекс центров слежения, координации, коррекции, информационной поддержки и управления данной навигационной системы [Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, 1997; Leick, 1995].

Непрерывные GPS измерения репера на поверхности земли в течение нескольких суток в сочетании со специальной математической обработкой (например, программным пакетом GAMIT/GLOBK) можно получить координаты этой марки с точностью до первых миллиметров. Регулярные измерения таких марок в течение нескольких лет позволяют определить скорости их относительных смещений с точностью до 1-2 миллиметров в год, что представляет интерес для целого ряда наук о Земле [Hamburger et al., 1994].

Данные GPS измерений дают возможность оценить уровень неоднородности и строение векторного поля скорости, существующего в наше время на поверхности земной коры. Данные такого рода для геодинамики и геофизики несут косвенную информацию о внутренних процессах Земли. Полученные векторы скорости могут отражать современную структуру земной коры и её пространственно-временную связь с геологическими построениями прошлых эпох, что важно и для геотектоники и геодинамики.

Наблюдения с использованием GPS технологии сопряжено с развертыванием на исследуемой территории GPS сети со специально оборудованными пунктами, которые объединены каким-либо целевым назначением. Так, в рамках всего Земного шара для геодинамических исследований континентальных масштабов создана международная GPS служба (IGS – International GPS Service), опирающаяся на различные региональные измерительные сети. Расстояния между пунктами такой *глобальной* сети колеблются от нескольких сотен до тысяч километров, а режим измерений относится к разряду перманентного (круглосуточного непрерывного) наблюдения.

Менее масштабные сети охватывают отдельные регионы планеты (обычно, наиболее подвижные пояса) с расстояниями между пунктами от десятков до сотен километров. Кроме этого, существуют локальные GPS сети для более детальных исследований отдельных структурных элементов земной коры, при этом наблюдения производятся с шагом от сотен метров до первых десятков километров. В зависимости от назначения и технических возможностей, для различных *региональных* и *локальных* сетей режим наблюдений может быть как *перманентным*, так и *эпизодическим*. Под эпизодическим наблюдением понимается разовое измерение каждого отдельного пункта GPS сети в течение нескольких суток (1–3, иногда более) с периодичностью от

нескольких месяцев до нескольких лет. Режимы наблюдений могут ещё отличаться по частоте дискретизации (обычно – 30 секунд) при записи информации с видимого "созвездия GPS спутников".

На территории Центральной Азии с 1992 г функционирует и развивается GPS сеть, которая поддерживается главным образом сотрудниками ИС РАН. По признанию ведущих специалистов в области космогеодезических наблюдений ЦА GPS сеть является одной из самых крупных и длительно функционирующих сетей в мире. Она охватывает важный, с точки зрения наук о Земле, подвижный регион сочленения Индии и Евразии. В состав ЦА GPS сети входят пункты с региональным, локальным и перманентным режимом наблюдений.

В данном отчете содержатся результаты геодезических и сопряженных с ними исследований на ноябрь 2016 г, в основном, эти работы охватывают Центральный и Западный Тянь-Шань на территории Киргизстана. В первой главе приводятся особенности измерений на ЦА GPS сети, собственно геодезические работы по видам на указанных территориях: региональные GPS измерения в Кыргызстане, исследования на Бишкекской локальной GPS сети, наблюдения на перманентных станциях.

Вторая глава посвящена построению поля векторов скорости на разных пространственных уровнях для территории исследования с использованием GPS данных за 1994-2015 гг. В заключительном разделе главы приводятся результаты исследований напряженно-деформированного состояния территории Центрального Тянь-Шаня на основе сейсмических (KNET) и GPS данных.

Третья глава отчета посвящена разработке методов и программных средств для обработки и анализа данных геодезических наблюдений. Здесь приведено описание предложенных алгоритмов для стабилизации временных рядов GPS пунктов и уравнивания данных прямых и обратных линейно-угловых измерений. Без таких вспомогательных работ по разработке методик и программных средств страдает аналитический процесс.

В четвертой главе отчета описаны результаты анализа комплексных геодезических измерений на детальных площадках POLIGON, KERNTOR и ALMALY.

# **1 Исследование современных движений земной коры на основе измерений GPS сети Центральной Азии**

## **1.1 Космогеодезические наблюдения на территории Центральной Азии**

Начиная с 1992 г и по настоящее время, сотрудники ИС РАН провели уже 25 полевых сезонов по исследованию современных движений земной коры ЦА на основе GPS метода. Силами сотрудников ИС РАН не только осуществляются измерения, но и устанавливаются новые пункты и поддерживается работоспособность существующих. Формируется банк GPS данных, где в упорядоченной структуре хранятся файлы полевых измерений, метаданных, промежуточной обработки и др. Функционирует база GPS данных, в которой сосредоточена вся необходимая информация для планирования и проведения полевых работ, обработки полевого материала и оперативного анализа.

В настоящее время под Центрально-Азиатской GPS сетью понимается группа специально оборудованных 685 пунктов на территории Киргизии (357), Казахстана (176), Таджикистана (43), Узбекистана (35) и Китая (74) (рис. 1.1-1). Для вышеприведенных пунктов имеются данные хотя бы одного GPS измерения в базе данных ИС РАН. Эта территория охватывает площадь около 2.2 млн. кв. км, в пределах  $60^{\circ}$ - $90^{\circ}$  в.д. и  $35^{\circ}$ - $55^{\circ}$  с.ш. Плотность ЦА GPS сети неравномерна по площади, и меняется в зависимости от идеологии при проектировании, доступности, пригодности для GPS измерений, геологического строения и других причин. Из общего числа GPS пунктов основное их количество относится к разряду региональных (~500), которые располагаются на расстоянии от десятков до сотен километров друг от друга и измеряются обычно один раз в 1-3 года по 36 часов. Для всей региональной сети среднее расстояние между пунктами ~60 км, а максимальное значение ~550 км. На территории Киргизии пункты региональной GPS сети расположены в среднем через ~35 км, при максимальной дистанции в ~200 км. Площади с более плотным расположением пунктов измерений (от первых до первых десятков километров) изучаются локальными GPS сетями. Наиболее детально охарактеризована Бишкекская локальная сеть, где пункты расположены друг от друга на расстоянии в среднем ~9 км, максимально до ~40 км. Так в пределах территории Бишкекской локальной GPS сети 4 раза в год измеряются собственно 36 пунктов данной сети и 10 фундаментальных тумб детальных площадок. С 1997 г ИС РАН производит сбор GPS данных со станций непрерывного наблюдения, в настоящее время их 13, три из которых (POL2, SELE и CHUM) входят в состав мировой (глобальной) сети IGS. Кроме этого, на детальной площадке ALMALY с 2005г в перманентном режиме на фундаментальных тумбах работают 4 GPS станции.

Подавляющее число измерений пунктов ЦА GPS сети было произведено силами ИС РАН. Пункты, расположенные на территории сопредельных с Кыргызстаном государств по

договоренности должны были измеряться национальными научно-исследовательскими организациями. В рамках двусторонних договоров производится обмен GPS информацией для проведения совместного расчёта скоростей по пунктам ЦА сети [например, Зубович и др., 2004; Mohadjer et al., 2010; Zubovich et al., 2010; Ischuk et al., 2013]. Однако с 2002г на территории Узбекистана и с 2006г. на территории Казахстана измерения региональных GPS пунктов не проводятся. Пересечение государственных границ этих государств сотрудниками ИС РАН с измерительной аппаратурой пока не представляется возможным. В рамках соглашений об обмене данными наблюдений между ИС РАН и Администрацией по землетрясениям Синьцзян-Уйгурского автономного района (Китай) в 2016 г данных о GPS измерениях пунктов на территории Китая к нам не поступало.

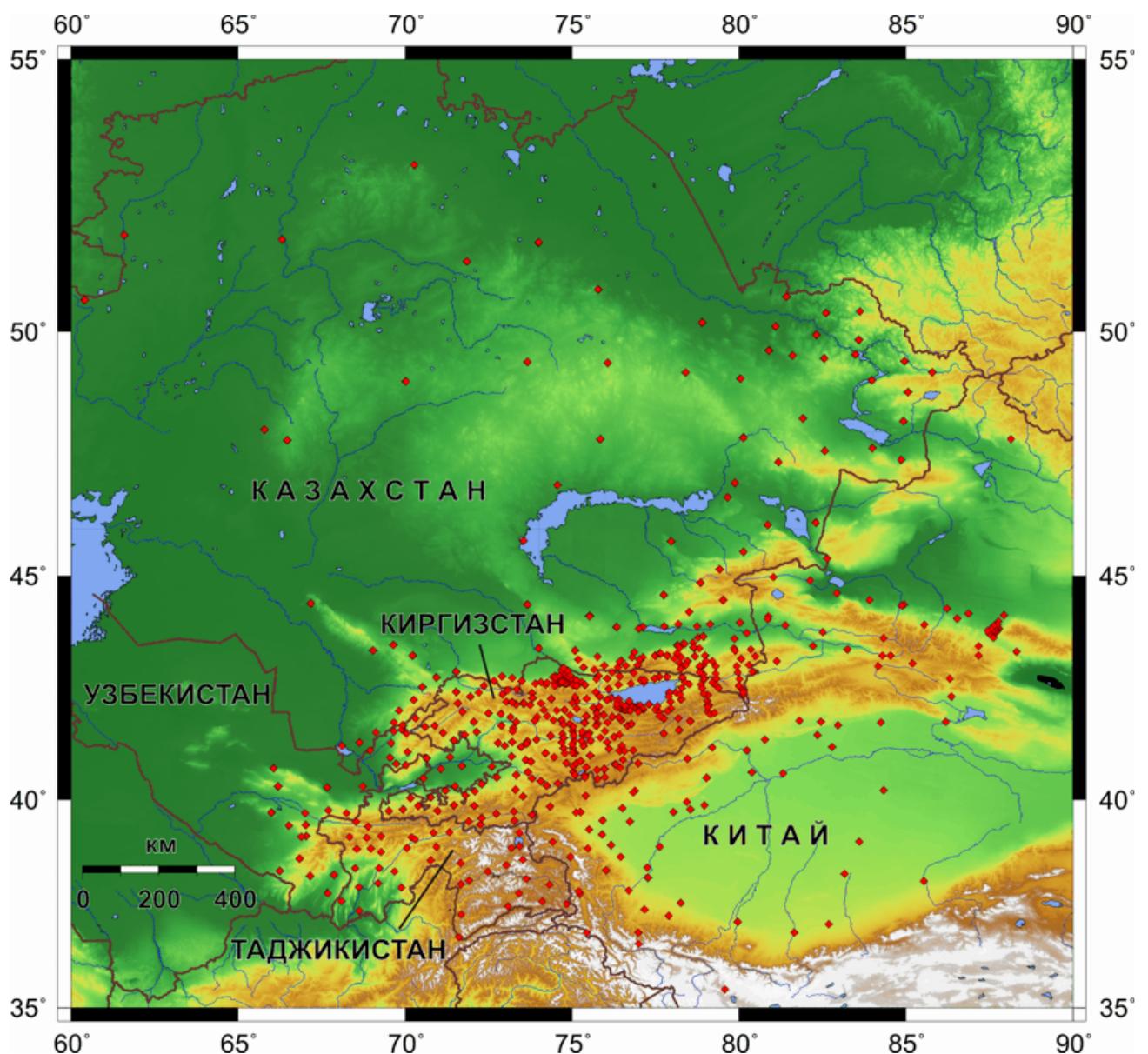


Рисунок 1.1-1 — Центрально-Азиатская GPS сеть, объединяющая 685 пунктов на территории Киргизии (357), Казахстана (176), Таджикистана (43), Узбекистана (35) и Китая (74).

Из теоритических расчетов и практических измерений известно, что для корректной оценки вектора скорости на региональном пункте необходимо провести на нем как минимум 3 эпизодических измерения в течение  $\geq 3$  лет, с увеличением числа измерений и продолжительности интервала измерений возрастает и достоверность значений скорости. Измерения на ЦА GPS сети в прошлые годы и в настоящее время осуществляются двухчастотными GPS приемниками фирмы TRIMBLE и TOPCON. Конструкция марок и штырей для антенн, а также приспособлений для вертикальной закладки марки разработана и реализована сотрудниками НС РАН [Современная..., 2005]. Штыревой способ GPS измерений считается наиболее надёжным.

Общее количество действующих пунктов не только увеличивается в связи с закладкой новых точек и открывающимся доступом к новой сторонней информации для смежных районов, но и уменьшается за счёт уничтожения измеряемых марок, прекращения физического или информационного доступа к ним и в силу других причин.

## 1.2 Установка новых и восстановление региональных GPS пунктов в Киргизстане

По результатам работ 2015 г для территории Центрального Тянь-Шаня были построены поля скорости дилатансии для 2-х уровней земной коры: для приповерхностного слоя до 5 км глубиной по GPS данным (рис. 1.2-1б); и для слоя 5-20 км глубиной на основе сейсмических данных (рис. 1.2-1а).

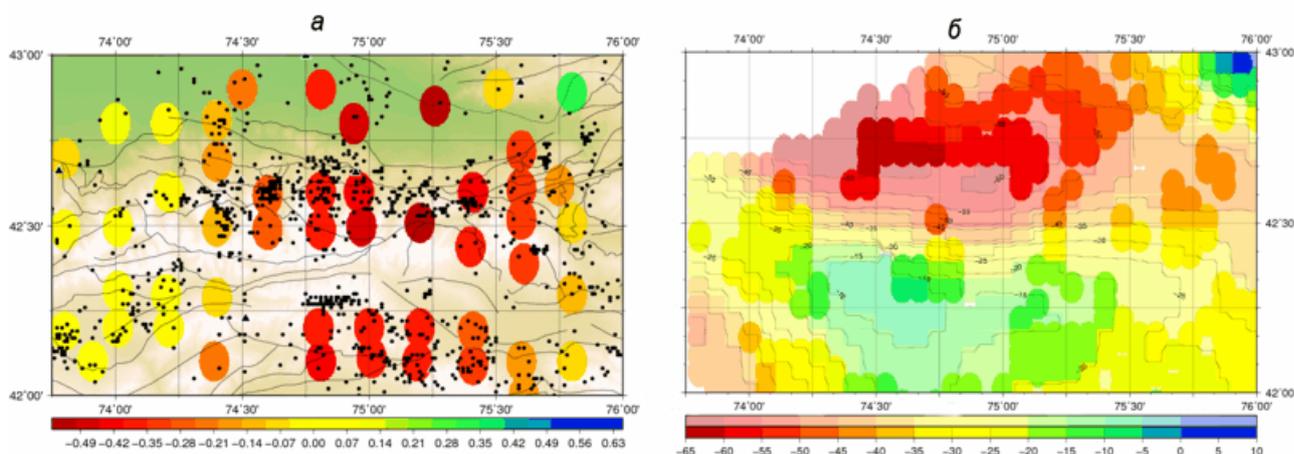


Рисунок 1.2-1 – Распределение суммы горизонтальных компонент тензора скорости деформации по сейсмическим (а) и GPS (б) данным.

Для значительной территории исследования отмечается высокая степень положительной корреляции в распределении скорости суммарной горизонтальной деформации (дилатансии) по сейсмологическим данным (глубина 5-20 км) и по данным приповерхностных GPS наблюдений за 1998-2014 гг. измерений. Исключение составляет центральная область исследуемой территории (горы Джумгал-Тоо), где фиксируются пониженные значения скорости приповерхностной

дилатансии (по GPS данным) и повышенные скорости деформации в расположенном ниже сейсмоактивном горизонте. Выявленные различия в распределении деформации для приповерхностной части и с глубиной (до 5 км) обозначают энергонасыщенный и потенциально опасный объем земной коры, с точки зрения проявления сейсмических событий и разрывных нарушений. В связи с этим в планы НИР на 2016 год была включена установка новых региональных GPS пунктов на территории гор Джумгал-Тоо для детализации здесь структуры СДЗК (рис. 1.2-2).

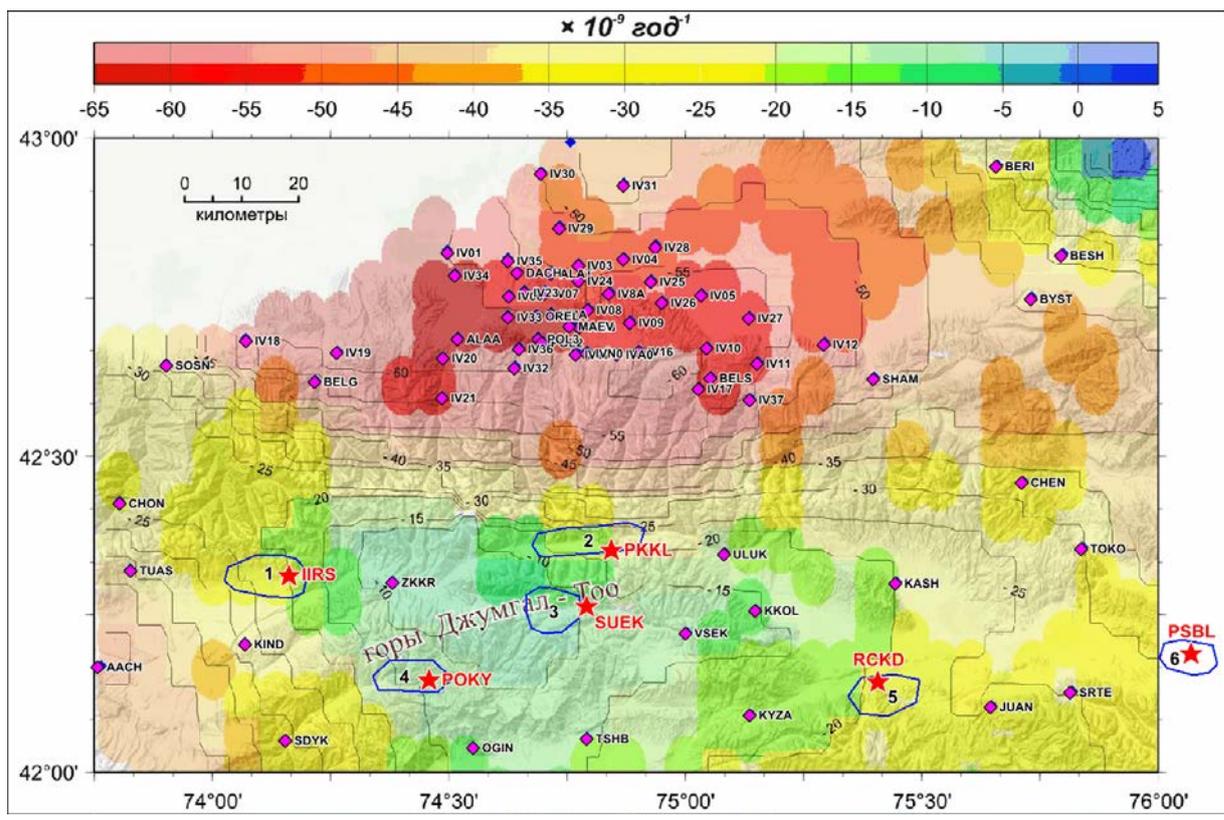


Рисунок 1.2-2 – Планируемые участки для закладки новых региональных GPS пунктов – синие контуры; заложенные в 2016г новые пункты – красные звездочки и названия; заложенные и измеренные ранее пункты – ромбики и их названия.

Таким образом, в июле 2016г нами было установлено 6 новых GPS пунктов в районе гор Джумгал-Тоо и Кочкорской впадины. На каждом новом пункте установлен каменно-земляной тур и по 3 геодезические марки, одна из которых американской конструкции – точечная лунка в торце металлического стержня, и 2 другие – латунные стержни резьбовой конструкции ИС РАН (рис. 1.2-3). Стержни GPS марок крепятся химическим анкером Hilti внутри высверленной полости в коренных породах. В редких случаях, при отсутствии подходящих обнажений палеозойских пород, марки устанавливаются в глыбах четвертичных пород, не подверженных явным экзогенным смещениям. Для каждого нового пункта составлены кроки подъезда к пункту, его

описания и схема нахождения марок. Сами марки по возможности прячутся от посторонних глаз, т.к. есть вероятность их разрушения любопытными вандалами.

Кроме этого в эту же поездку (июль 2016г) были дополнительно заложены 2 марки на пункте TURS взамен уничтоженных, и также на пункте TOSS установлены 2 грунтовые марки со смещением на ~300 м к востоку из-за трудности подхода к пункту (рис. 1.2-4).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.2-3 – Установка новых GPS пунктов: а) типы марок для закладки; б) высверливание отверстий для марок; в) установленная марка американского типа; г) устройство каменно-земляного опознавательного тура недалеко от GPS марок.

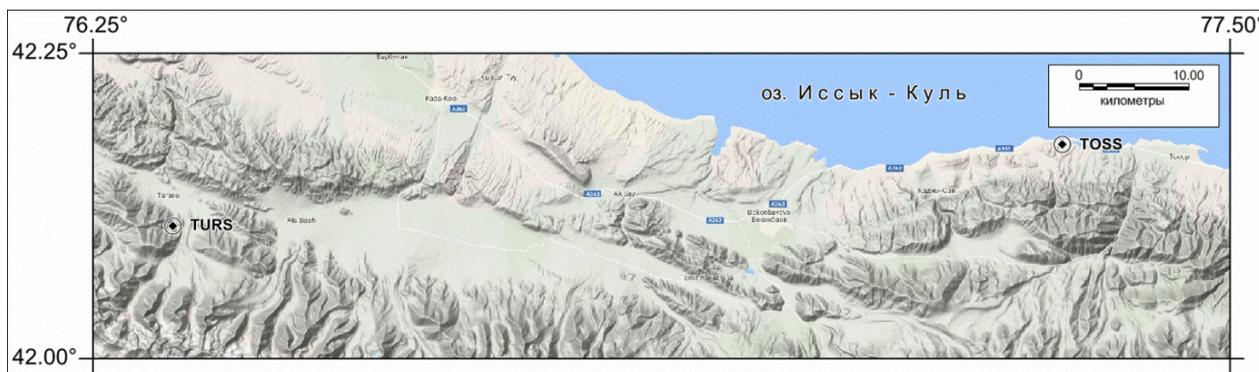


Рисунок 1.2-4 – Положение региональных GPS пунктов TURS и TOSS, на которых произведена реконструкция старых и установка по две новые марки.

### 1.3 Измерения региональных GPS пунктов в Киргизстане

В Киргизии региональная сеть охватывает относительно большие территории и включает в себя значительное количество GPS пунктов, измерение которых требует использование значительных материальных и людских ресурсов. В настоящее время сотрудники ИС РАН имеют возможность на каждом из региональных пунктов проводить только один 36-часовой цикл GPS измерений в течение 1-3 лет. В ЦА регионе территория Киргизии наиболее детально охарактеризована GPS пунктами, в настоящее время эта сеть включает в себя более 300 действующих пунктов (рис. 1.1-1). Измерения на некоторых из них проводятся с 1993 г и имеют наибольшую частоту измерений по сравнению с остальной частью ЦА сети. На территории Кыргызстана измерения всех региональных GPS пунктов до настоящего времени производятся силами сотрудников ИС РАН.

В мае-сентябре 2016 года были осуществлены 3 региональные кампании KGS16a, KGS16b и KGS16c по измерению пунктов на территории Киргизии. В GPS кампаниях 2016 года традиционно участвовало по четыре автономные бригады. Полевая бригада состоит из GPS оператора и водителя автомашины ЗИЛ-131 с кузовным отсеком, приспособленным для жизни в полевых условиях. Бригада снабжается необходимой измерительной и вспомогательной аппаратурой, бытовыми принадлежностями. В дороге полевая группа пополняет только запасы воды, продуктов и бензина. При этом она способна автономно в течение месяца осуществить измерение до 14-15 пунктов. Связь с бригадами осуществляется по радиации в соответствии с графиком радиосвязи, в районе охвата территории сотовыми операторами – через мобильную связь. Пробег автомобилей в региональных кампаниях 2016 г составил от 750 до 2450, в среднем – 1.27 тысячи километров с расходом ~60 литров бензина на 100 км пробега ЗИЛ-131.

В периоды 12 мая – 09 июня и 27 июня – 24 июля 2016 г проходили полномасштабные кампании KGS16a и KGS16b соответственно, по 4 бригады – каждая. Последняя кампания KGS16c включала измерения 3-х пунктов только 1-й бригадой 06-12 сентября 2016 г, при этом измерялись одновременно вновь заложенные марки по 3 прибора на каждом пункте. На все эти кампании было намечено 115 пунктов, из которых на SSR4 оператором зафиксировано полное уничтожение всех марок, поэтому он был заменен на дополнительный пункт TAM4. К пунктам СНЕК и ККСН из-за погодных условий не удалось подъехать, а с пункта KASU опять же из-за дождей не удалось съехать и измерения вынужденно продолжались здесь 2-е сессии подряд. Таким образом, за летний сезон отмерено 113 региональных пунктов, из которых на 8 пунктах измерены по 3 марки (рис. 1.3-1). Совместное измерение нескольких марок на одном пункте проводится не более 1-2 раза для фиксации совместного их позиционирования. Если произойдет уничтожение основной марки, то такие данные измерений позволят проводить последующие измерения на одной из запасных марок без потери накопленной информации позиционирования пункта в целом. Для

запасных марок отсутствие хотя бы одного единственного измерения является критичным, практически обесценивающим предназначение запасных марок по технологии регулярных измерений и обработки таких данных.

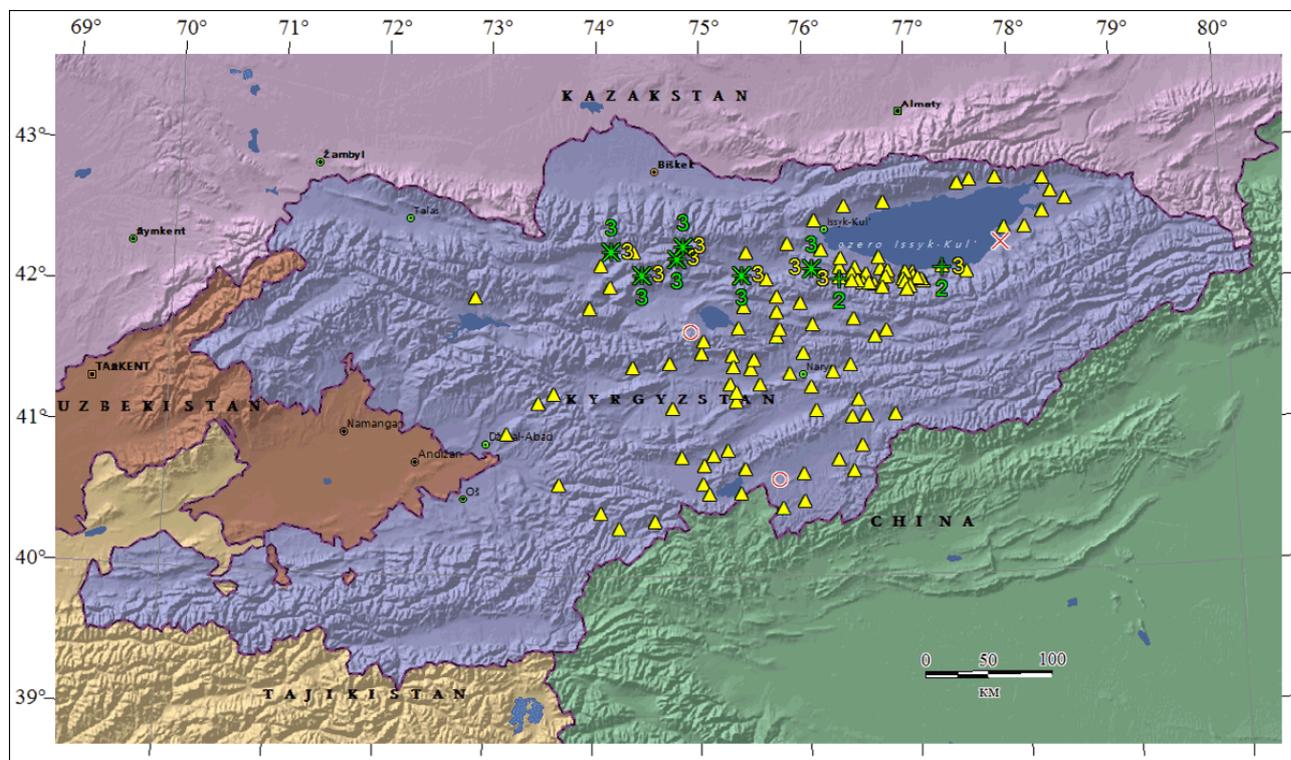


Рисунок 1.3-1 – Положение 113 региональных GPS пунктов (желтые треугольники), измеренных в 2016 г. Желтые числа – количество одновременно измеренных на пункте марок. Зеленые плюсы – пункты, на которых произведена закладка новых марок; зеленые звездочки – новые пункты 2016г; зеленые числа – количество новых марок. Красные кружочки – не измеренные GPS пункты, красные крестики – уничтоженные пункты.

Все полученные в 2016 г файлы полевых GPS измерений были размещены в структурированном архиве, имеющим как минимум три копии. Вся необходимая информация, связанная с новыми данными измерений размещена в базе GPS данных.

#### 1.4 Измерения в пределах Бишкекской локальной GPS сети

Бишкекская локальной GPS сети по несколько раз в год опрашивается с 1997 г и по настоящее время сотрудниками ИС РАН. Цель данных наблюдений заключается в изучении современных движений земной коры в районе сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины, в наблюдении за деформационной обстановкой в районе самого густонаселенного района Кыргызстана – г. Бишкек и его пригородов. Пункты Бишкекской GPS сети удалены друг от друга в среднем на ~9 км.

С 1997 г Бишкекская локальная GPS сеть состояла из 25 пунктов, в 2000 г в ее состав включили 7 фундаментальных тумб светодальномерных профилей, с 2002 г сеть была уплотнена еще 15 грунтовыми пунктами. За последние годы регулярному измерению подлежало 36-40

пунктов. В 2012 г были организованы детальные площадки POLIGON и KENTOR комплексного геодезического наблюдения за сегментами разломов с фундаментальными тумбами. Пункт POL3, на котором длительное время проводились GPS измерения в составе локальной сети, вошел в состав 6 реперов площадки POLIGON. В 4 метрах от грунтового пункта локальной сети IV22 была установлена тумба IK05, которая входит в состав 4 реперов площадки KENTOR. Таким образом, локальная сеть и детальные площадки имеют общие репера и единый режим GPS измерений. Поэтому с 2012 г в кампании опроса локальной GPS сети входят 36 пунктов собственно локальной сети и вместе с ними 10 фундаментальных пунктов геодезических площадок POLIGON и KENTOR (рис. 1.4-1). В состав GPS пунктов площадки POLIGON входят 6 тумб: POL3 и POLY, заложенные в 1983 г; IP02, IP03, IP04 и IP05, установленные в 2012г. Площадка KENTOR включает в себя 4 тумбы: IK02 и IK03 (1984 г), IK05 и IK06 (2012 г).

Продолжительность локальной измерительной сессии на каждом пункте составляет 36 часов. Продолжительность локальной GPS кампании составляет всего 11-13 дней. За две такие кампании четыре бригады опрашивают 36 пунктов локальной GPS сети и 10 пунктов детальных геодезических площадок. Измерения осуществляются с помощью двухчастотных GPS приемников Topcon Legacy-E. На ноябрь 2016 г проведено 3 полных цикла измерений, и до конца года будет проведен 4-й цикл измерений локальной GPS сети. В октябре 2016г, во время очередной локальной кампании было зафиксировано полное уничтожение пункта IV31.

Полученные GPS данные по Бишкекской локальной сети за 2016 г размещены в структурированном архиве, находятся в стадии верификации и подготовки для дальнейшей обработки. Вся необходимая информация об измерениях размещена в базе GPS данных.

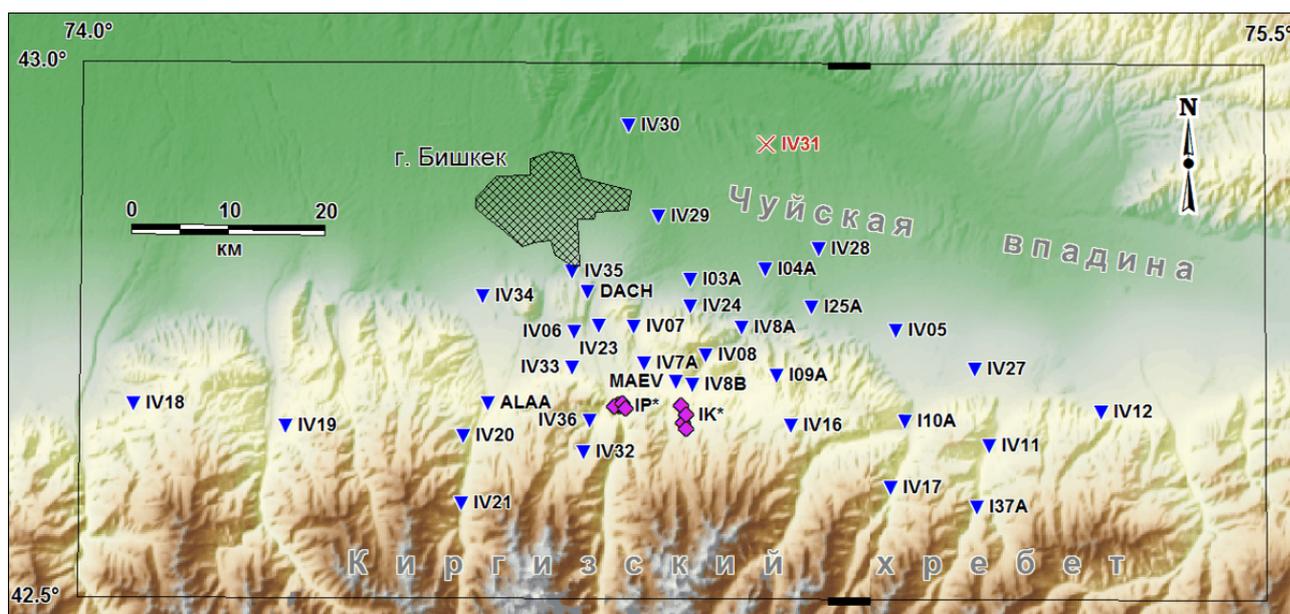


Рисунок 1.4-1 – Положение пунктов (синие треугольники) Бишкекской локальной GPS сети и 10 фундаментальных тумб детальных площадок (сиреневые ромбики) POLIGON (IP\*\*) и KENTOR (IK\*\*). Красным цветом и крестиком отмечен пункт, марки которого уничтожены в текущем году.

## 1.5 Измерения на перманентных станциях Центрально-Азиатской GPS сети.

Сотрудниками НС РАН в 2016 г был продолжен сбор данных с 13 перманентных GPS станций непрерывного наблюдения на территории Центрально-Азиатской сети (Казахстана, Кыргызстана и Таджикистана, рис. 1.5-1).

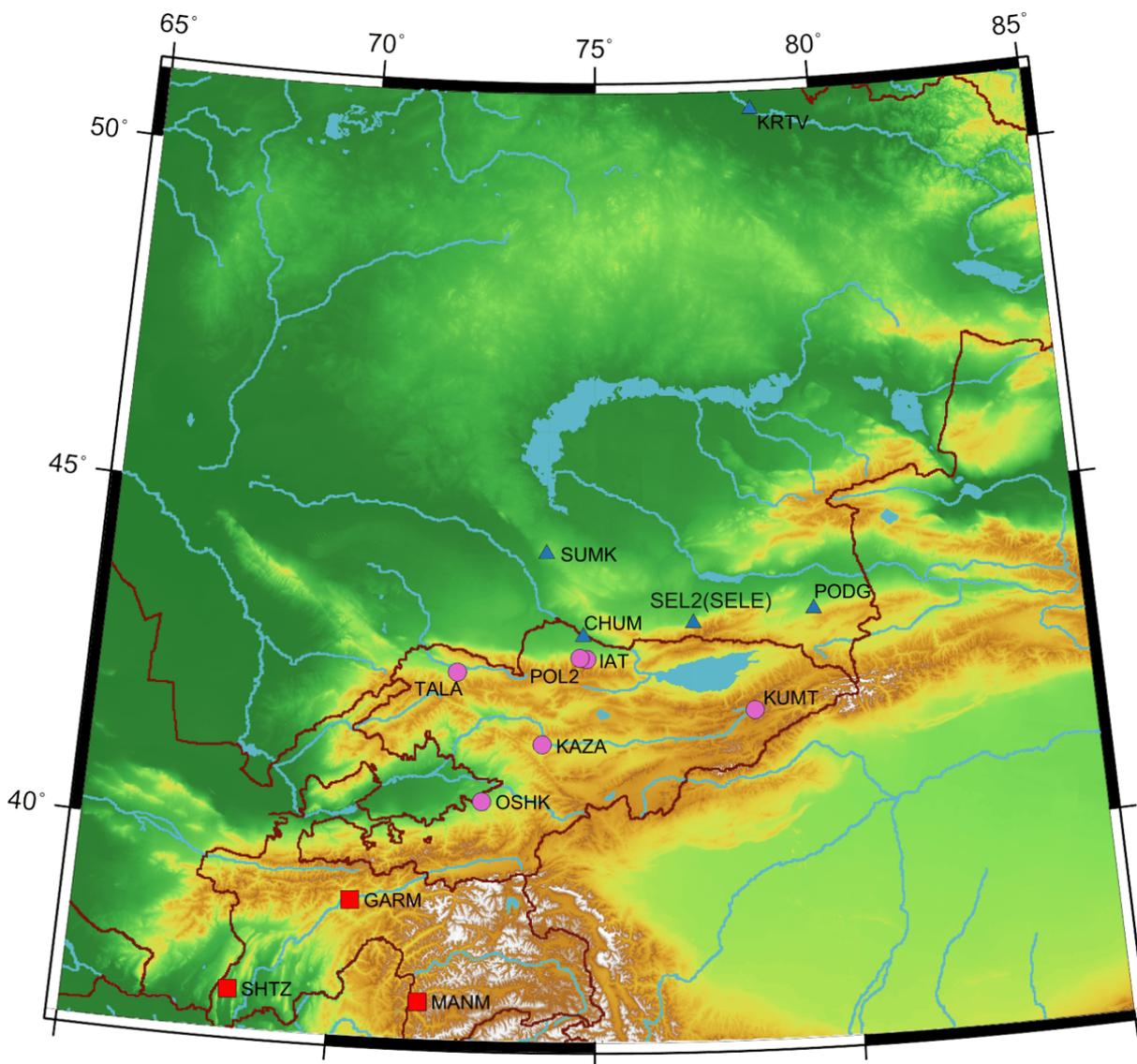


Рисунок 1.5-1 – Положение 13 перманентных GPS станций, с которых НС РАН собирает данные в Казахстане (5), Кыргызстане (5) и Таджикистане (3). Кроме этого, непрерывному измерению подлежат 4 пункта на детальной площадке ALMALY (IAT)

Из них три станции POL2, SEL2(SELE) и CHUM входят в мировую сеть IGS (International GNSS [Global Navigation Satellite Systems] Service). Данные измерений от перманентных пунктов поступают в открытый банк данных UNAVCO и доступны в Интернете по адресу: [http://facility.unavco.org/data/gnss/perm\\_sta.php](http://facility.unavco.org/data/gnss/perm_sta.php). Но с сентября 2016г информация с перманентных станций прекратила поступать в UNAVCO из-за выхода из строя (при ударе молнии) основного интернет канала. Поэтому до настоящего времени канал связи для передачи GPS данных не восстановлен, хотя усилия для возобновления его работы со стороны НС РАН предпринимаются.

Данные измерений перманентных GPS станций используются при обработке GPS данных региональных и локальных пунктов, благодаря чему есть возможность:

- стабилизировать решения для эпизодических GPS измерений на локальном и региональном уровнях сетей Центральной Азии;
- посуточно сверяться с данными IGS, осуществлять глобальную и региональную стабилизацию измерений, привязываться к мировой системе отсчета;
- исследовать временные вариации GPS данных и геодинамических факторов, и пр.

Без передачи данных измерений хотя бы с 3-х IGS станций (POL2, SEL2 и CHUM) первые два пункта (привязка к мировой сети координат и стабилизация решений посуточно) практически обеспечить не возможно, т.к. соответствующие службы не включают данные измерений этих станций в глобальный расчет уравнивания координат всех IGS станций. Что в свою очередь чревато для наших расчетов снижением точности позиционирования эпизодических пунктов на отсутствующие дни наших станций в глобальных IGS решениях.

Станция POL2 установлена первой в Центрально-Азиатском регионе и функционирует уже более 17 лет. Длительное и качественное поддержание непрерывного функционирования станции позволили ей войти не только в сеть международной службы IGS, но и попасть в реестр сети GGN (Global GPS Network). Сеть GGN предъявляет к своим станциям более жесткие эксплуатационные требования, в частности необходима дискретизация записи данных в 1 секунду и передача данных в режиме on-line.

Помимо вышеописанных 13 перманентных станций, с 2006 г на геодезической площадке ALMALY в непрерывном режиме проводятся измерения на четырех фундаментальных марках (IAT на рис. 1.5-1). Эти измерения могут прерываться со снятием аппаратуры на время, требуемое для измерений нескольких марок одновременно на эпизодических пунктах.

## **2 Изучение пространственно-временной структуры поля скорости движений на территории Центральной Азии, сопоставление с геолого-геофизическими данными**

В 2016 году сотрудники ИС РАН провели 25 сезон по исследованию современных движений земной коры на основе GPS метода. Этот ежегодно повторяющийся процесс включает в себя три основных этапа: полевые GPS измерения, обработка данных и анализ полученных результатов. При этом четко обособить можно только этап полевых работ, который может включать в себя установку GPS пунктов и собственно их измерение. Но последующие этапы чаще всего тесно переплетены между собой и представляют собой процесс в виде сменяющихся итераций обработка–анализ–обработка–анализ–... Технология и алгоритмы получения высокоточных параметров движения земной коры пока не является оптимально оформленными для всех случаев при анализе результатов GPS наблюдений. Основная причина в том, что чаще всего уровни геодинамических движений земной коры не значительно превышают суммарный уровень рядовых ошибок от измерения позиции до ее интерпретации. Поэтому сам расчет высокоточных параметров движения требует разработки алгоритмов, которые позволят выделить и более четко обозначить уровень полезного сигнала для локальной территории. Несомненно, возможности в этом направлении есть.

В предыдущей главе охарактеризован этап полевых измерений и сбора GPS данных. В данном разделе будет кратко обозначен общий порядок обработки данных GPS измерений. На основе данных GPS наблюдений за 1994-2015 гг. представлен вариант расчета векторов скорости для регулярно опрашиваемой территории Киргизского Тянь-Шаня и для Бишкекской локальной сети. В заключительной части главы приводятся результаты анализа сейсмических данных для территории сейсмологической сети KNET. Данные работы направлены на выявление особенностей протекающего здесь сейсмического процесса и его связи с приповерхностными деформациями, отражаемыми в результатах GPS наблюдений.

### **2.1 Порядок обработки данных GPS измерений**

Программный комплекс (ПК) GAMIT/GLOBK за десятки лет существования много раз подвергался модификации специалистами Массачусетского технологического института, но общий порядок всего процесса обработки GPS данных принципиально не меняется и состоит условно из трех этапов.

Первый этап включает в себя верификацию файлов полевых GPS измерений и преобразование к единому формату RINEX [Gurtner, 1994; Gurtner, Estey, 2015], посредством конвертирования программой TEQC [Estey, Meertens, 1999; TEQC..., 2015]. Затем унифицированные GPS данные обрабатываются программным пакетом GAMIT. Все этого этапа

занимают до 80-90 % времени, затраченного на весь процесс обработки GPS данных до получения временных рядов и векторов скорости.

На втором этапе программным пакетом GLOBK происходит обработка данных на основе фильтра Кальмана. При этом осуществляется объединение решений, полученных в GAMIT. Но в GLOBK объединение и осреднение данных проводится по выбранным временным интервалам (количество суток). При обработке GPS данных в НС РАН используются интервалы осреднения равные 1, или 5, или 7 дням, или длительности полевых компаний. При этом значения координат для участвующих в этой компании пунктов приписываются середине или концу выбранного интервала. Чем короче интервал осреднения и больше объем входных GPS данных, тем длительнее процесс обработки.

На третьем этапе программа GLOBK рассчитывает единое скоростное решение за весь период наблюдений на основе решений отдельных интервалов осреднения. Для привязки наших данных GPS измерений к мировой системе отсчета (СО) и геодезических координат (эллипсоид аппроксимации геоида WGS84) по технологии GLOBK используются синхронные с нашими наблюдениями данные мировых IGS станций СО ITRF-2008. Для уменьшения разброса координат для отдельных пунктов с течением времени используются системы отсчета континентального масштаба, в нашем случае наилучшим образом применима СО EURA-08. Для нее предлагается список из 560 IGS станций, каждая из которых может иметь несколько сегментов временного ряда координат с хорошо обозначенным линейным трендом. При этом число уникальных опорных временных рядов IGS станций EURA-08 достигает 1110. Помимо этого для региональной стабилизации нами используется 16 IGS станций, которые располагаются в районе ЦА GPS сети.

В 2016 г сотрудниками лаборатории были обработаны "сырые" GPS данные за 2015 г на стадии GAMIT при помощи ПК GAMIT/GLOBK 10.6 [Herring et al., 2015a; 2015b; 2015c], и стадия GLOBK отработывалась на предыдущей версии 10.5. Планируется перевод всех рабочих мест на версию GAMIT/GLOBK 10.6. Программой GLOBK рассчитан вариант векторов скорости для Центрально-Азиатской GPS сети в системе отсчета EURA 2008 за 1994-2015 годы наблюдений с интервалом осреднения в 5 дней. Полученные данные GPS измерений за 2016 г находятся в стадии верификации и подготовки к дальнейшей обработке.

## **2.2 Векторы скорости на разных масштабных уровнях в пределах Центрально-Азиатской GPS сети**

На стадии первичной обработки из данных GPS наблюдений за 1994-2015 гг. исключены пункты, которые имеют меньше 2-х измерений за весь интервал наблюдений и общую продолжительность измерений менее 1-го года. По результатам обработки представлен набор из

571 горизонтальных векторов скорости, сигмы которых не превышают 2 мм/год (рис. 2.2-1). Расчеты осуществлены в системе отсчета EURA-08.

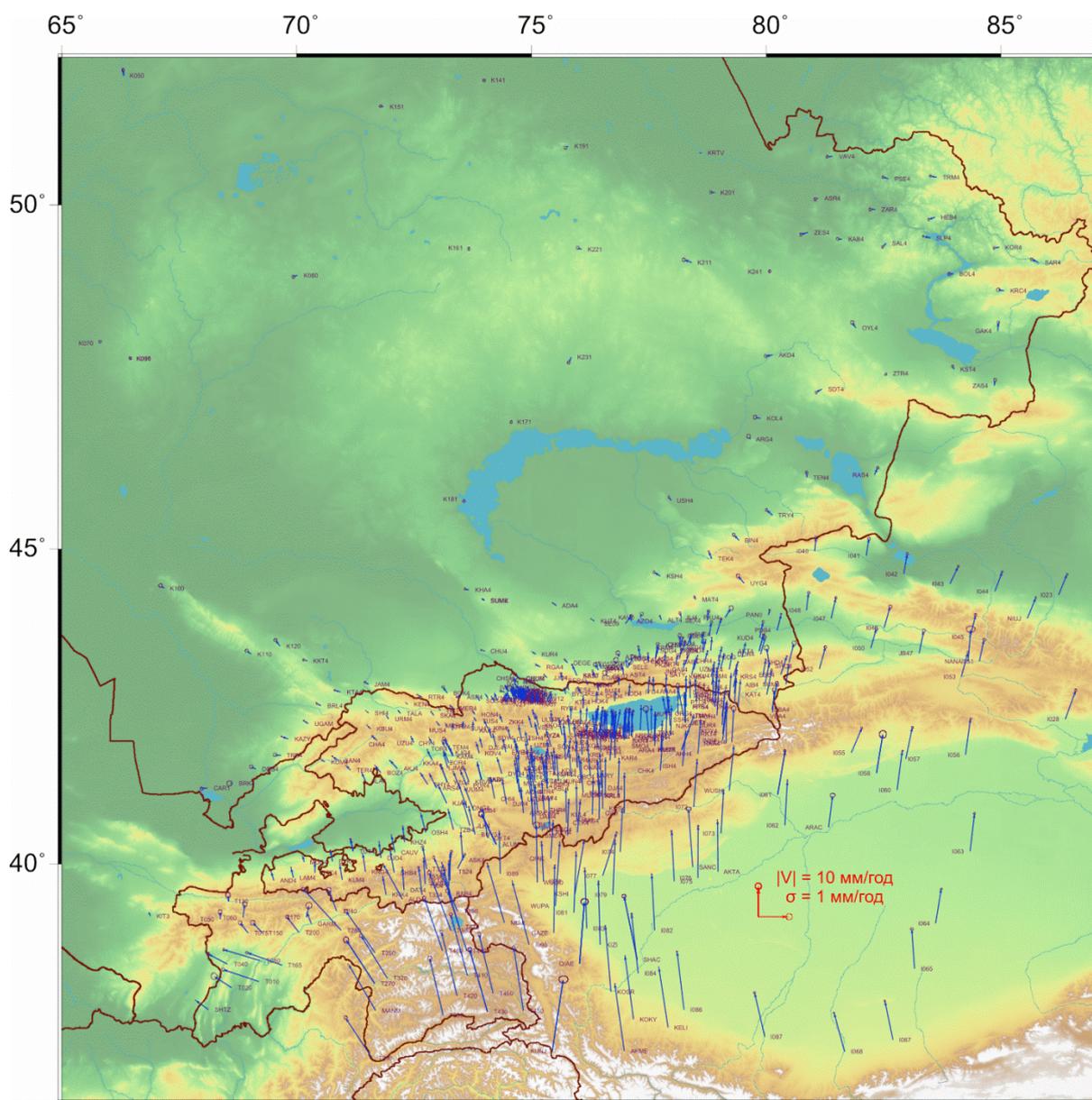


Рисунок 2.2-1 – Горизонтальные векторы скорости ( $\sigma_{NE} \leq 2$  мм/год) для 571 региональных, локальных и перманентных пунктов Центрально-Азиатской GPS сети, рассчитанные за 1994-2015 гг. измерения в системе отсчета EURA 2008

Поскольку весь процесс обработки данных GPS измерений в GAMIT/GLOBK до получения векторов скорости и временных рядов координат занимает большой объем работы и времени, то оперативно исправить все выявленные ошибки через повторный пересчет затруднительно. В этих случаях могут помочь разрабатываемые нами алгоритмы и программы для оперативных пересчетов координат и векторов скорости на основе временных рядов координат, уже рассчитанных в результате единого решения в GAMIT/GLOBK.

Наиболее продолжительные и полные ряды GPS наблюдений имеют региональные пункты по территории Киргизстана (рис. 2.2-2).

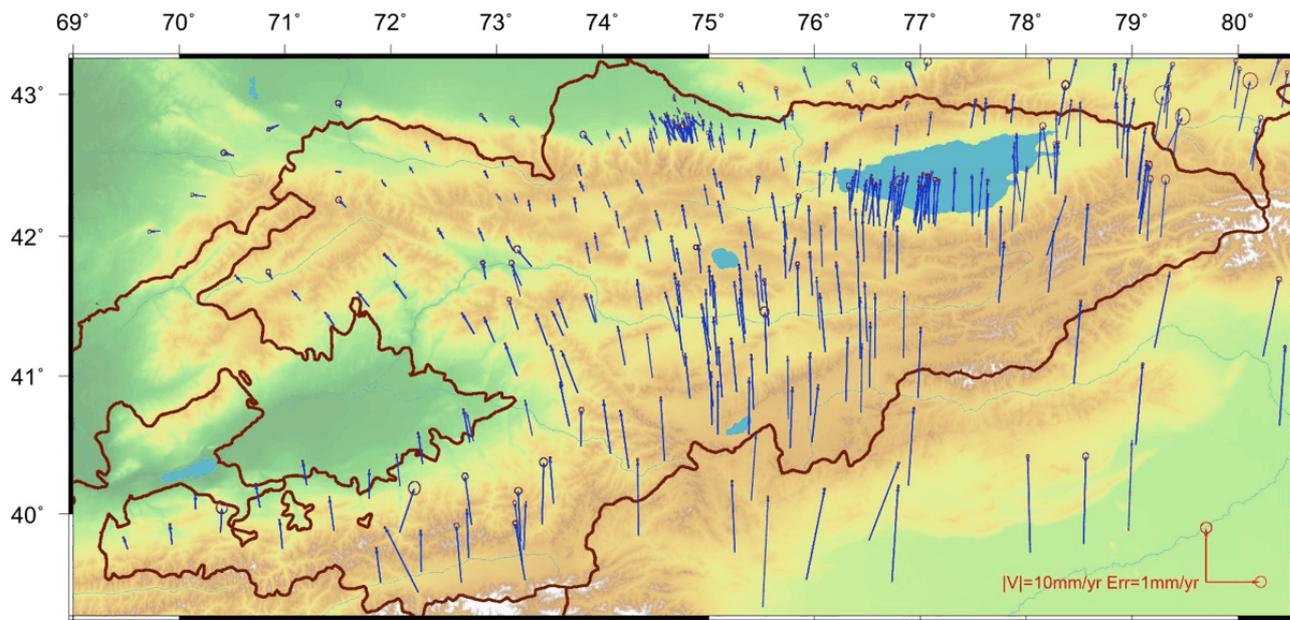


Рисунок 2.2-2 – Векторы скорости Киргизского Тянь-Шаня, рассчитанные в EURA 2008 за 1994-2015 гг. измерений. Оценки горизонтальных ошибок –  $< 2$  мм/год.

По сравнению с региональной GPS сетью Киргизского Тянь-Шаня более детальной является локальная сеть, которая опрашивается по 4 раза в год. На рис. 2.2-3 приводятся горизонтальные векторы скорости для 36 пунктов Бишкекской локальной сети, и усредненные векторы для детальных площадок KENTOR (IK0\*, 4 пункта) и POLIGON (IP0\*, 6 пунктов) в системе отсчета EURA 2008 за 1997 – 2015 гг.

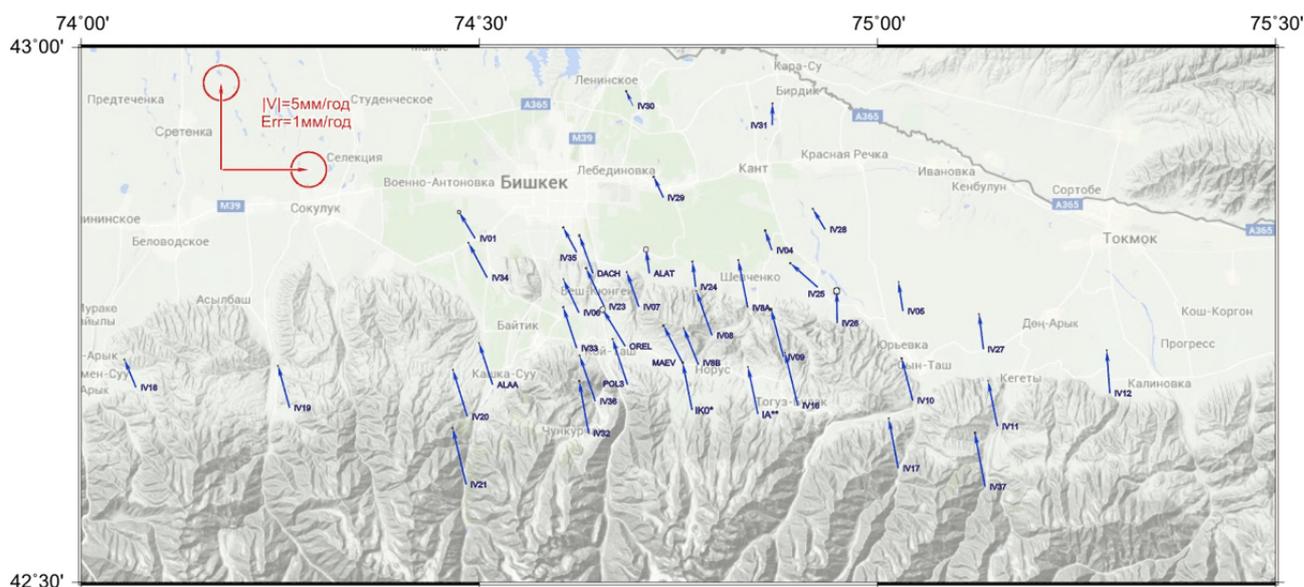


Рисунок 2.2-3 – Горизонтальные векторы скорости движения пунктов Бишкекской локальной GPS сети, и усредненные векторы для детальных площадок KENTOR (IK0\*, 4 пункта) и ALMALY (IA\*\*, 4 пункт) в системе отсчета EURA 2008 за 1997 – 2015 гг.

### 2.3 Закономерности падения напряжений при землетрясениях Северного Тянь-Шаня

Разработка новых подходов к прогнозированию разрушительных землетрясений (ЗЛТ) и уменьшению их последствий включает, по необходимости, расширение объема данных о спектральных характеристиках очагов ЗЛТ, и определяемых на их основе динамических параметрах. Информация об этих параметрах, в частности, изменение со временем усредненного снятия напряжений для событий заданных магнитуд отражает, с достаточной полнотой, поле напряжений и физические процессы в очаговых областях. Массовое определение динамических параметров: радиуса очага  $r$ , скалярного сейсмического момента  $M_0$ , и снятия напряжений  $\Delta\sigma$ , с использованием спектров сейсмограмм умеренных и даже слабых событий позволяет сформировать однородные и представительные сводки этих параметров, так что возможно применение к ним статистических методов анализа.

Представляет интерес сопоставить распределения динамических параметров ( $r$ ,  $M_0$ ,  $\Delta\sigma$ ) и кинематических характеристик, т.е. с интенсивностью сеймотектонической деформации (СТД) и усредненными фокальными параметрами. Здесь этот вопрос рассматривается на примере Северного Тянь-Шаня на основе данных телеметрической сети KNET включающей 10 станций. Сеть обеспечивает регистрацию локальной сейсмичности внутри области ( $41^\circ$ - $43^\circ$  с.ш.,  $73^\circ$ - $77^\circ$  в.д.). Для этой области в работах [Сычева и др., 2005, 2011; Костюк и др., 2010] были определены фокальные параметры (более 1000 решений), усредненные механизмы СТД, а также интенсивность сеймотектонической деформации. Однако для умеренных событий, произошедших внутри сети KNET в период 1998-2012 гг., количество определений динамических параметров явно недостаточно для статистического анализа. В данной работе среди записей KNET сейсмограмм отобраны более слабые землетрясения, пригодные для построения спектров. Произведен расчет и систематизация динамических параметров (ДП) ЗЛТ Северного Тянь-Шаня и составлен каталог (сводка ДП).

Стоит отметить, что по сложившейся мировой практике динамические параметры очагов ЗЛТ определяются, как правило, для сильных землетрясений [Кальметьева и др., 1992; Бурымская, 2001; Ключевский, Демьянович, 2002; Dzierwonski et. al., 1981; Parolai et. al., 2007]. Лишь в нескольких работах в прошлом столетии расчеты динамических параметров также проводились и для слабых событий [Горбунова, Кальметьева, 1988; Кальметьева и др., 1992]. В недавней работе [Сычева, Богомолов, 2014] было показано, что современная методика расчета динамических параметров очагов ЗЛТ может с успехом применяться для событий “умеренных” магнитуд  $M = 3,9$ -  $5,5$  (энергетический класс  $K = 11$ - $14$ ). Упомянутая методика включает классический подход к выделению и интерпретации спектральных параметров [Костров, 1975; Ризниченко, 1976; Арефьев, 2003; Brune 1970; Madariaga, 1983] и отработанные в последнее время методы перехода

от стационарного спектра к очаговому (приведению к точке на референтном расстоянии от гипоцентра с учетом стационарных поправок [Аптекман и др., 1989; Parolai et al., 2007] и трансформации спектра из-за частотной зависимости добротности среды [Ameri et al., 2009; Oth et al., 2011]). При анализе результатов этой работы было обращено внимание, что величина падения (снятия) напряжений  $\Delta\sigma$  может зависеть не только от магнитуды  $M$  (или класса  $K$ ), но и от типа фокального механизма. Имеются примеры, когда при землетрясениях взбросового типа падение напряжений больше, чем при сдвиговых событиях примерно такой же энергии. При этом отличие превышает доверительный интервал расчета  $\Delta\sigma$ . Вклад фокального механизма в величину  $\Delta\sigma$  может свидетельствовать, что анализ результатов расчета динамических параметров не сводится к одному только построению аппроксимационных зависимостей величин  $r$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $\log(M_0)$  от магнитуды событий, подобно работе [Ключевский, Демьянович, 2002] для Байкальского региона. Для дальнейшего анализа взаимосвязи динамических параметров и механизма очагов в настоящей работе в расчет включены землетрясения с  $K > 9.5$  (магнитуды  $M > 3$ ), благодаря этому число записей в сводке динамических параметров достигло 85, т.е. в 6 раз больше по сравнению с данными из нашей предыдущей работы. Проведено сравнение расчетных значений динамических параметров и их распределения по изучаемой территории внутри сети KNET [Сычева и др., 2005], с распределением параметра Лоде-Надаи (кинематической характеристикой), и угла напряженно-деформированного состояния  $\omega$  [Соколовский, 1969]. Расширение объема данных о динамических параметрах также позволило проанализировать особенности падения напряжений для отдельных выборок землетрясений по типу фокального механизма.

### 2.3.1 Данные для исследования

В качестве исходных данных были использованы сейсмограммы локальных землетрясений, которые произошли на территории станций сети KNET за 1998-2012 гг. с  $K=9.5-13.7$  (рис. 2.3.1-1).

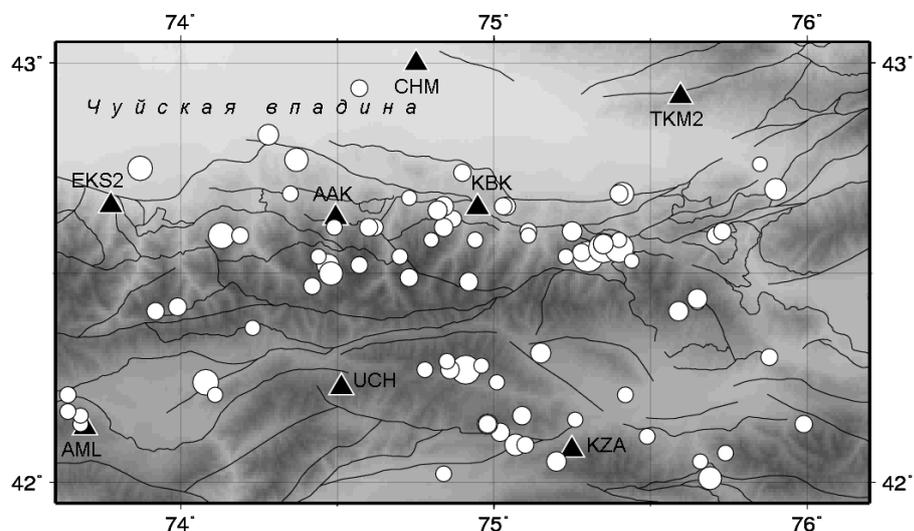


Рисунок 2.3.1-1 – Эпицентральное расположение землетрясений на территории KNET за 1998-2012 гг. с  $K > 9.5$  (85 событий).

Основная часть ЗЛТ расположена на северных склонах Киргизского хребта, хребте Карамойнок, горах Сандык, в районах Суусамырской и Кочкорской впадин. На рисунке 2.3.1-2 представлены гистограммы распределений событий по магнитудам и глубинам.

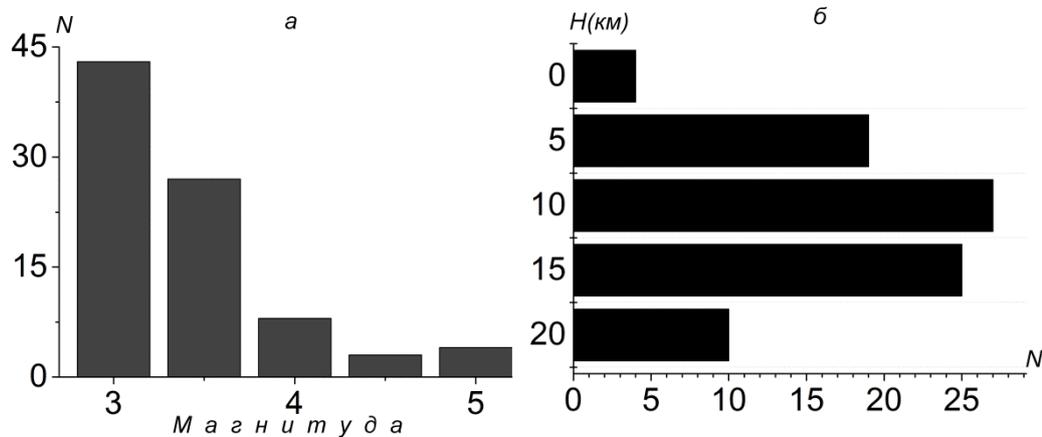


Рисунок 2.3.1-2 – Гистограммы распределения исследуемых событий: а - по магнитуде; б - по глубине.

В соответствии с графиком, магнитуда рассматриваемых событий меняется в диапазоне 3-5 (пересчет из класса в магнитуду согласно зависимости  $K=1,8M+4$  [Ризниченко, 1985]), и большая часть событий расположена на глубине 5-15 км. Наряду с расчетом спектральных характеристик землетрясений (станционные спектры), определялись фокальные механизмы очагов (66 событий) и тензора сейсмических моментов (14 событий) исследуемых событий. Для решения этих задач использовались записи скоростей сейсмоволн (в нм/с) с частотой оцифровки 100 Гц.

### 2.3.2 Основы и методика расчета динамических параметров землетрясений

Расчет динамических параметров очагов ЗЛТ: радиуса очага,  $r$ , скалярного сейсмического момента,  $M_0$ , и падения напряжения,  $\Delta\sigma$ , проводился с использованием выражений, вытекающих из известной модели “мгновенного” смещения вдоль поверхности разрыва [Аки, Ричардс, 1983]. Сам очаг моделируется сферой, которую перерезает эта поверхность. В такой модели величины радиуса  $r$  и момента  $M_0$  определяются по спектральным характеристикам сейсмограмм независимо друг от друга, а  $\Delta\sigma$  оказывается пропорциональным отношению  $M_0/r^3$  [Костров, 1975; Ризниченко, 1985]. Размер очага (так называемый радиус Брюна,  $r = r_B$ ) определяется формулой:

$$r = 2.34 V_s / 2\pi f_0 \quad (2.1)$$

где  $V_s$  – скорость поперечных волн,  $f_0$  – угловая частота, определяемая по изменению (излому) характерного для низких частот линейного тренда спектральной плотности. При применении формулы Брюна поверхность разрыва обычно считается круговой, с радиусом  $R$ , а зона очага – сферической. Тогда площадь разрыва равна  $S = \pi r^2$ , а скалярный сейсмический момент описывается, согласно [Аки, Ричардс, 1983], как произведение:

$$M_0 = \mu \pi r^2 D \quad (2.2)$$

В (2.2)  $\mu$  - модуль сдвига по месту очага,  $D$  - среднее смещение вдоль плоскости разрыва. Практически во всех моделях очага считается, что смещение происходит одновременно по всей плоскости разрыва. Выражение для расчета скалярного момента по низкочастотному пределу спектральной плотности смещения  $\Omega_0$  вытекает из решений волновых уравнений для сферически расходящихся сейсмоволн [Аки, Ричардс, 1983]. Это выражение записывается в форме:

$$M_0 = 4\pi \rho R V_s^3 \Omega_0 / \Psi_\theta \quad (2.3)$$

где  $\rho$  - плотность пород в области очага,  $R$  - гипоцентральное расстояние,  $\Psi_\theta$  - фактор направленности излучения из очага (для источника, описываемого скачком смещения на плоскости разрыва), среднее значение этого фактора принимается 0,64 [Ризниченко, 1985]. В дальнейшем будем для краткости называть  $\Omega_0$  амплитудой на нулевой частоте, или НЧ амплитудой. Стоит отметить, что формула (2.3) справедлива для любых расстояний от источника, превышающих характерную длину волны, т.е. в волновой зоне [Аки, Ричардс, 1983]. Однако наибольшая точность получается для относительно небольших расстояний  $R$ , когда значения  $\rho$ ,  $V_s$ , в самом очаге и в референтной точке можно считать одинаковыми. Для оценки падения напряжения для землетрясения с моментом  $M_0$  можно использовать выражение:

$$\Delta\sigma = 7M_0 / 16r^3 \quad (2.4)$$

в котором коэффициент пропорциональности между  $\Delta\sigma$  и отношение  $M_0/r^3$  выбран в соответствии с расчетами [Brune, 1970] для модели поверхности разрыва в форме круга.

При расчетах динамических параметров ЗЛТ по формулам (2.1-2.4) значения плотности, скорости поперечных волн и модуля сдвига принимались равными, соответственно,  $\rho=2.6$  г/см<sup>3</sup> [Чедия, 1986],  $V_s = 3.5$  км/с, [Roecker et al., 1993],  $\mu = 2 \times 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>.

Обработка сейсмограмм для построения спектральных зависимостей и определения базовых параметров  $f_0$  и  $\Omega_0$ , входящих в выражения для расчета динамических параметров (2.1) и (2.3), включает в себя следующие этапы: 1 - выбор станций и интервалов сейсмограмм; 2 - расчет спектров сейсмограмм по месту регистрации; 3 - приведение спектра к референтной точке в окрестности очага (переход к спектрам источников). При выполнении расчетов на этапах 1-3 использовались ставшие стандартными алгоритмы и методы, которые описаны в ряде работ [Аптекман и др., 1989; Ameri et al., 2009; Oth et al., 2011; Parolai et al., 2007]. В работе [Сычева Богомолов, 2014] были рассмотрены вопросы адаптации этих методов для случая сейсмограмм со станций сети KNET. В этой работе для определения значений параметров  $f_0$  и  $\Omega_0$  применена та же методика, так что можно ограничиться кратким описанием тех особенностей расчетов, которые

важны для понимания результатов. Отметим, прежде всего, что сейсмические ряды со станций KNET представляют собой записи скорости, и для нахождения  $f_0$ ,  $\Omega_0$  с использованием упомянутой методики спектры скоростей пересчитывались на смещения.

Для расчета стационарного спектра выбирались станции, которые находятся на расстоянии более 35 км (дальняя зона) для событий с  $K < 11.5$  и более 50 км для событий с  $K > 11.5$ . Станции, удовлетворяющие этим условиям, были отсортированы в порядке удаления от очага и выбирались первые три станции из этой последовательности. Для каждой из них стационарный спектр приводился к спектру “в очаге” ЗЛТ, а реально к референтной точке, находящейся на расстоянии 10 км от гипоцентра. Далее, по полученному очаговому спектру определялась угловая частота,  $f_0$ , и уровень спектральной плотности  $\Omega_0$ . Для расчетов использовалось максимальное значение спектральной плотности, определенное по трем станциям.

Уровень спектральной плотности зависит от точности определения добротности среды, используемой при вычислении затухающей функции. Использование данных о добротности среды в разных источниках может менять на 1.5-2% значение скалярного сейсмического момента. Нами были использованы значения добротности, определенные по данным сети KNET, на основе исследования кода волн более 25 000 записей землетрясений по каждой сейсмической станции.

Для определения фокального механизма использовалось два подхода, которые подробно описаны в работе [Сычева, Богомолов, 2014]. По знаку прихода  $P$  волны фокальные механизмы очагов [Reasenber and Oppenheimer, 1985] получены для 80 событий, пять событий имеют краевое расположение относительно станций сети KNET, что затрудняет получение однозначного решения. На рис. 2.3.2-1 представлена карта полученных решений фокальных механизмов.

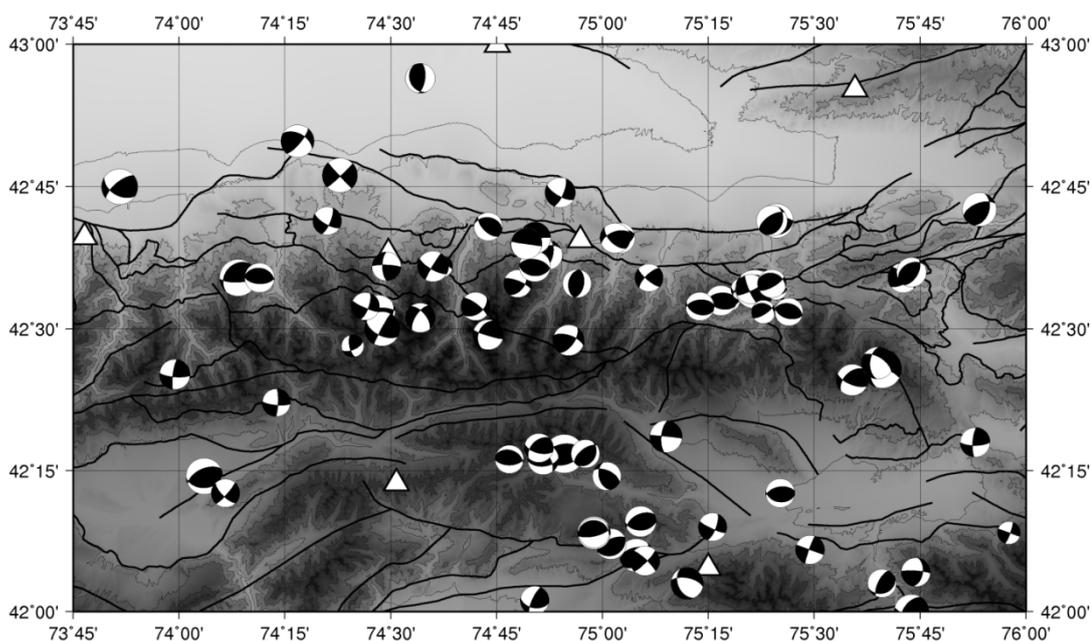


Рисунок 2.3.2-1 – Фокальные механизмы очагов исследуемых 80 событий.

Среди механизмов можно отметить взбросовый, взбросо-сдвиговый и сдвиговый характер. Взбросы расположены вдоль Иссык-Атинского разлома и на северных склонах хр. Сындык и Карамойнок. По инверсному методу [Yagi, 2004, Костюк, 2008, Костюк и др., 2010] были определены тензора сейсмических моментов 14 событий. Малое количество решений связано со спецификой этого метода – события должны быть с  $K > 10.5$ .

### 2.3.3 Результаты расчета динамических параметров землетрясений

Рассчитаны параметры спектральных характеристик – значение угловой частоты  $f_0$  и уровень спектральной плотности  $\Omega_0$ . Для рассматриваемого класса событий ( $M=3-5.4$ )  $\Omega_0$  меняется от  $2.30E-6$  до  $2.09E-3$  м·с, а  $f_0$  от 1.6 до 7.3 Гц (что соответствует времени разрыва в очаге 0.63-0.14 сек). Рассчитаны такие параметры как: скалярный сейсмический момент  $M_0$ , радиус Брюна  $r$  и падение напряжений  $\Delta\sigma$ . Согласно полученным результатам  $M_0$  меняется от  $5.36E+21$  до  $4.89E+24$  дин·см, уровень падения напряжений от 1 до ~92 бар и радиус Брюна от ~200 до ~800 м.

Для дальнейшего анализа весь период исследования был поделен на три временных интервала: 1998-2003; 2004-2007; 2008-2012 гг., в которые произошли соответственно 24, 31, 30 событий. Это позволит оценить изменение значений динамических параметров не только за весь период исследования, но по каждому из вышеопределенных периодов.

*Угловая частота.* Зависимость угловой частоты от магнитуды события приведена на рисунке 2.3.3-1 за весь период исследования и за выбранные временные интервалы. Все из представленных зависимостей описываются линейным трендом с отрицательным углом наклона: чем выше магнитуда землетрясения, тем ниже значение угловой частоты (тем выше значение времени разрыва в очаге).

*Скалярный сейсмический момент.* На рисунке 2.3.3-2 приведены зависимости  $\lg(M_0)$  от магнитуды события за те же временные интервалы, что и на рисунке 2.3.3-1. График на рисунке 6 описывается линейной аппроксимацией  $\lg(M_0) = 18,6 + 1,1 M$ , что свидетельствует о тенденции: - чем выше магнитуда, тем выше значение скалярного сейсмического момента.

*Радиус Брюна.* Рисунок 2.3.3-3 (а-г) демонстрирует зависимость радиуса Брюна от магнитуды события. В распределении этого параметра наблюдаются значительные отклонения от линейного тренда для некоторых событий, которые произошли в период 1998-2008гг. с  $M > 4.5$ .

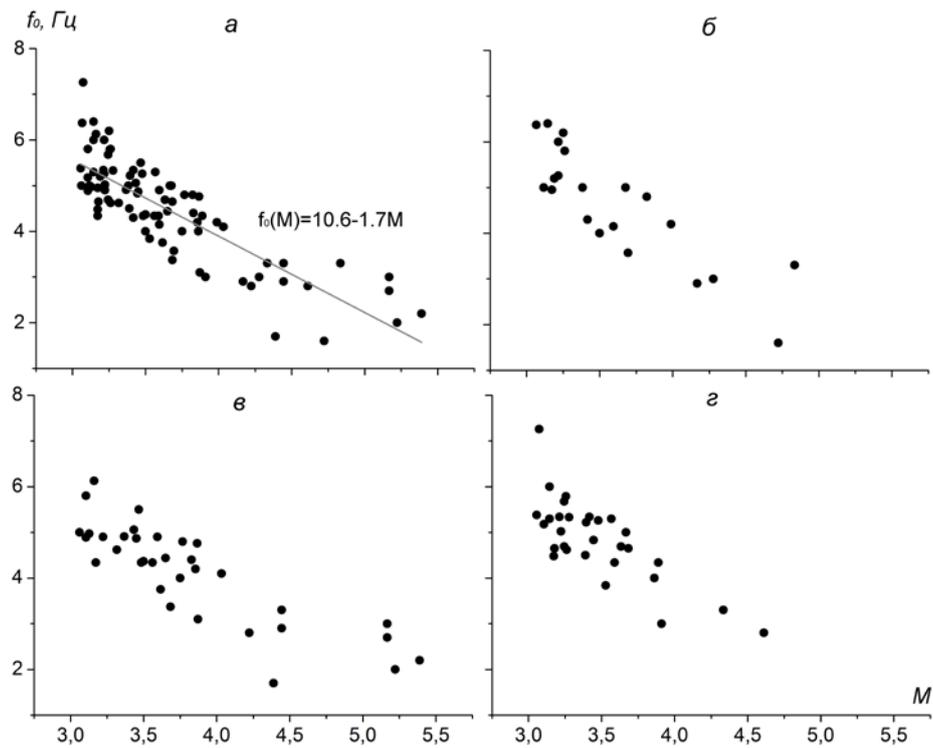


Рисунок 2.3.3-1 – Зависимость угловой частоты от магнитуды землетрясения: а - все события (1998-2012гг.); б - 1998-2003 гг.; в-2004-2007 гг.; г-2008-2012гг.

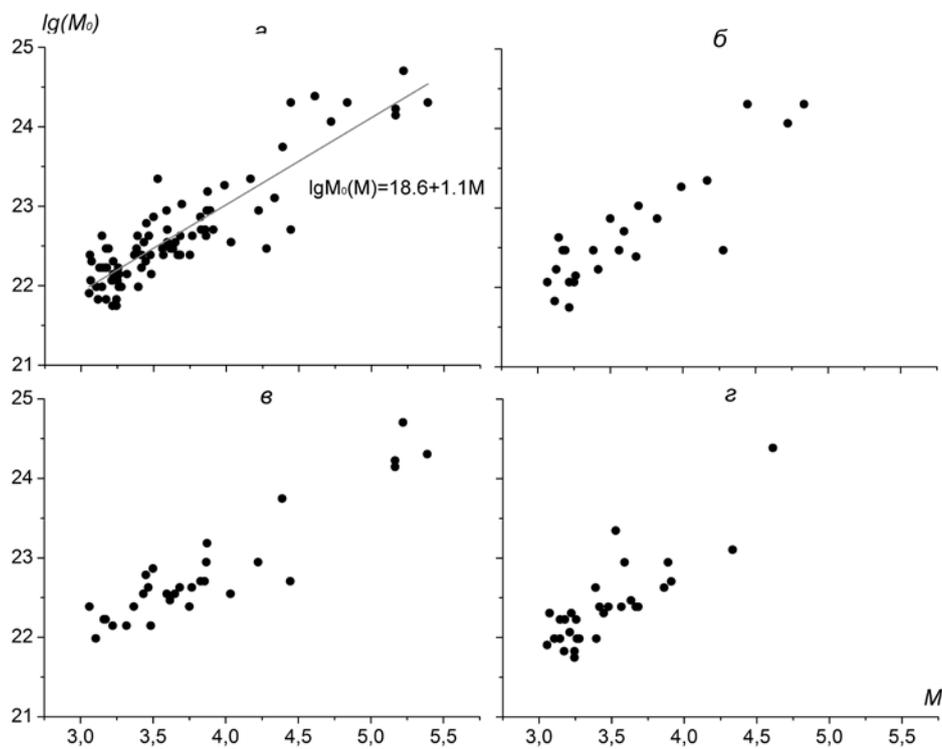


Рисунок 2.3.3-2 – Зависимость  $\lg(M_0)$  от магнитуды землетрясения: а - все события (1998-2012гг.); б - 1998-2003 гг.; в-2004-2007 гг.; г-2008-2012гг.

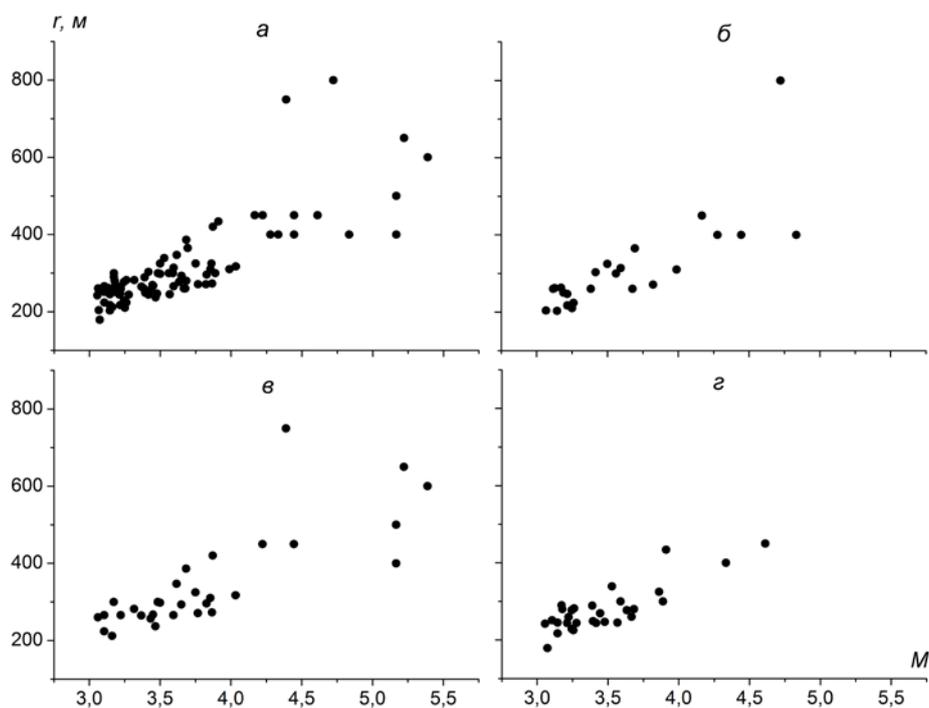


Рисунок 2.3.3-3 – Зависимость радиуса очага ( $r$ ) от магнитуды землетрясения: а - все события (1998-2012гг.); б - 1998-2003 гг.; в-2004-2007 гг.; г-2008-2012гг.

*Падение напряжений.* Согласно формуле расчета, падение напряжений обратно пропорционально зависит от радиуса Брюна в третьей степени, и соответственно разброс в значениях радиуса очага ведет к значительному разбросу значений падения напряжений. Полученные зависимости  $\lg(\Delta\sigma)$  от магнитуды приведены на рисунке 2.3.3-4 (а-г).

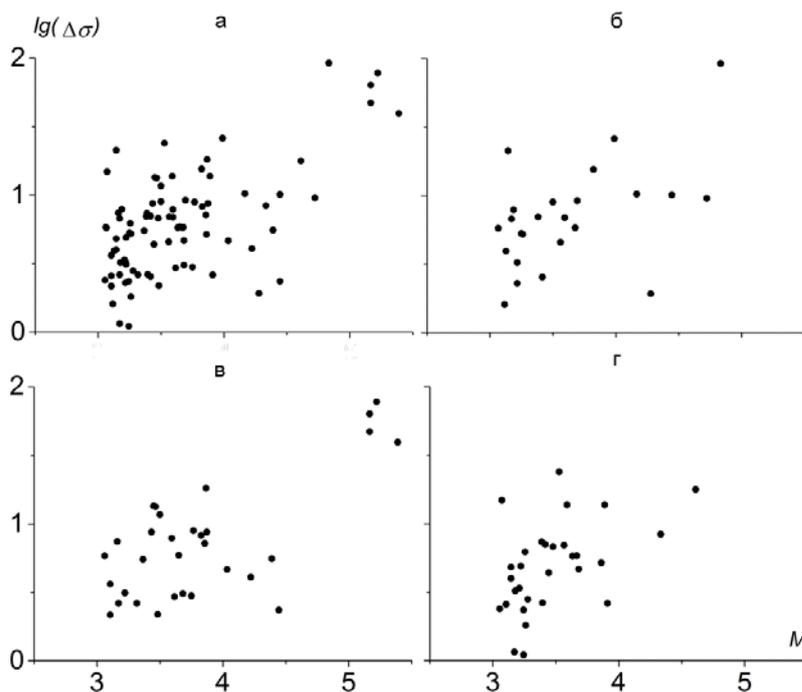


Рисунок 2.3.3-4 – Зависимость  $\lg(\Delta\sigma)$  от магнитуды землетрясения: а - все события (1998-2012гг.); б - 1998-2003 гг.; в-2004-2007 гг.; г-2008-2012гг.

Распределение этого параметра в логарифмическом масштабе имеет «облачный» тип распределения и характеризуется тем, что в диапазоне магнитуд  $M$  3-4,5 для всех групп событий с близкими магнитудами ( $\pm 0,2$  от заданного среднего  $M_{cp}$ ) значения  $\Delta\sigma$  попадают в интервал 2-20 бар, причем разброс не зависит от  $M_{cp}$ . С другой стороны, близкие значения  $\Delta\sigma$  (например, лежащие в полосе  $\pm 1$  бар) обнаруживаются для 5-8 событий с магнитудами 3-4,5. Это означает практическую независимость падения напряжений в очагах слабых землетрясений от их магнитуды. Этот неожиданный результат согласуется с выводами из недавней работы [Kwiatek et al, 2011], где анализировались события пико сейсмичности (магнитуды от -4 до -1,5), или, другими словами сейсмоакустическая эмиссия.

На рисунке 2.3.3-5 представлена гистограмма распределения падения напряжений во времени для 85 событий. На этом же графике горизонтальными серыми линиями отмечены уровни падения напряжений – 5, 10, 30 и 90 бар. Серыми прямоугольниками на рисунке отмечены периоды с уровнем падения напряжений  $<10$  или  $>30$  бар. Нанесение этих данных позволило отметить некоторую закономерность в падении напряжений: периоду значительного сброса напряжений ( $>30$  бар) соответствует период некоторого «затишья», когда падение напряжений не превышает уровня 5-10 бар.

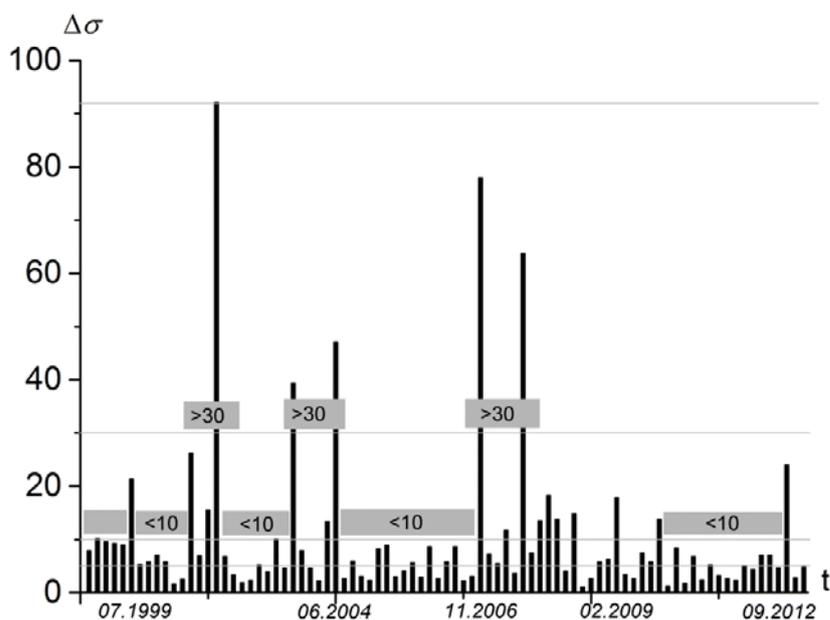


Рисунок 2.3.3-5 – Гистограмма распределения падения напряжений во времени.

На рисунке 2.3.3-6 представлено распределение числа событий по величине падения напряжения, построенное для диапазонов 1-3, 3-6, 6-12, 12-24, 24-48 и 48-96 бар. Обращает на себя внимание сходство этого графика с хорошо известным распределением количества событий по магнитудам (энергиям). Если графики  $\lg(\Delta\sigma)$  в зависимости от магнитуд (рис. 2.3.3-4) не

обнаруживают определенной закономерности, то на этом графике закономерность очевидна – сходство с графиком повторяемости.

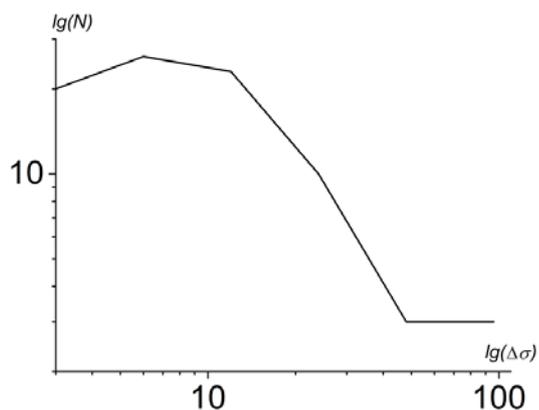


Рисунок 2.3.3-6 – Зависимость количества событий от уровня падения напряжений в логарифмическом масштабе.

*Сравнение полученных результатов с результатами других исследователей.* Анализ корреляционной связи между скалярным сейсмическим моментом, радиусом очага и других динамических параметров от величины землетрясения рассматривается в работе [Ризниченко, 1985]. На рисунке 2.3.3-7 представлены результаты, полученные в данной работе и зависимости из работы [Ризниченко, 1985]: распределение значений сейсмических моментов, полученных в данной работе, находятся выше, а значения радиусов ниже некоторой теоретической кривой из работы Ризниченко.

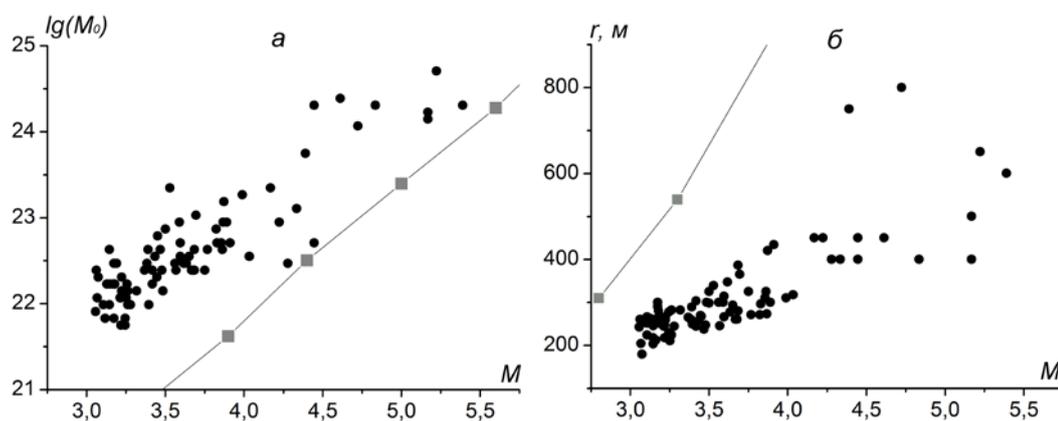


Рисунок 2.3.3-7 – Сравнение распределения  $M_0$  и  $r$  с установленными средними зависимостями по [Ризниченко, 1985] – квадратные маркеры и линия.

На рисунке 2.3.3-8а представлено распределение сейсмического момента  $\lg(M_0)$  от размера очага  $r$ . На этом же графике обозначены границы распределения событий с разным уровнем падения напряжений – до 10 бар и выше 10 бар. Положение событий с уровнем падения напряжений более 10 бар обозначено серыми точками. Аналогичная зависимость была получена в

работе [Сычев, Коновалов, 2013], в которой рассматриваются афтершоки 3-х крупных сейсмических событий (рисунок 2.3.3-8б). В этой работе большая часть событий попали в область с падением напряжений 10-100 бар. Этот результат можно объяснить тем, что эти афтершоки характеризуются более высокой магнитудой, чем рассматриваемые в данной работе.

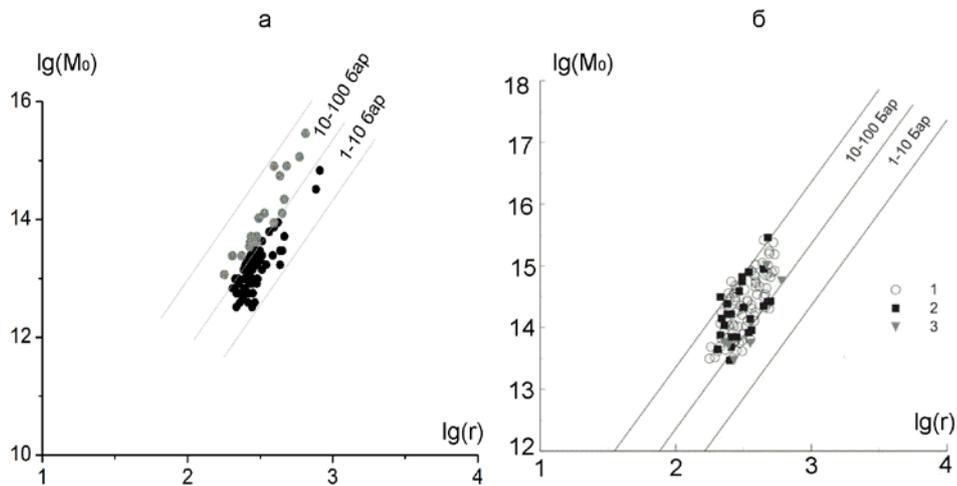


Рисунок 2.3.3-8 – Зависимость  $\lg(M_0) = f(\lg(r))$  : а) по данной работе; б) из работы [Сычев, Коновалов, 2013].

*Падение напряжений и фокальные механизмы.* На рисунке 2.3.3-9а кружками отмечено эпицентральное расположение всех исследуемых событий, черными цветом выделены землетрясения (19 событий), для которых  $\Delta\sigma > 10$  бар.

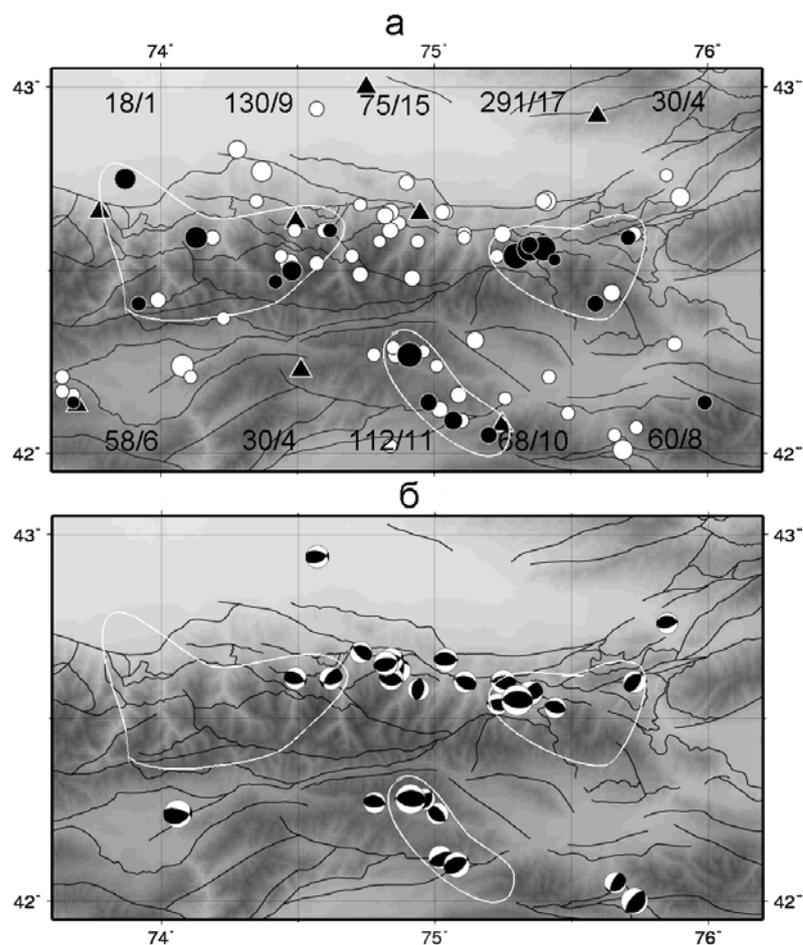


Рисунок 2.3.3-9 – Расположение исследуемых событий (85), черным цветом помечены землетрясения с  $\Delta\sigma > 10$  бар (а). Положение землетрясений (33), имеющих взбросовый характер механизма очага (б).

Суммарное падение напряжений для всех событий составляет 868 бар. На этом же рисунке в каждой прямоугольной области ( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ) карты вынесено суммарное значение  $\Delta\sigma$  и количество событий, произошедших в ней. События, отмеченные черным цветом, группируются в трех областях: первая расположена в восточной части Киргизского хребта, вторая - вытянута вдоль хребтов Сындык и Карамойнок, и третья находится западнее  $74.5^\circ$  в.д. по Киргизскому хребту и включает в себя отдельно расположенные события. Каждой из этих областей соответствует значительная величина уровня падения напряжений. Большая часть событий первой зоны расположена вдоль восточной части Иссык-Атинского разлома, и такое значительное падение напряжений в этой зоне может говорить об его активности на этом участке.

На рисунке 2.3.3-9б представлено положение событий, имеющих взбросовый характер механизма очага. При этом значительная часть взбросов группируется в областях, отмеченных по уровню  $\Delta\sigma$  (рисунок 2.3.3-9а).

В таблице 2.3.3.1 представлены фокальные механизмы 15 из 19 землетрясений (для 4-х землетрясений механизмы не определены) с  $\Delta\sigma > 10$  бар. В этой же таблице отмечены величины падения напряжений и класс события. Суммарное падение напряжений взбросовых событий этой

таблицы составляет 63% (344.6 бар) от общего уровня падения напряжений 544.5 бар для 19 событий.

Таблица 2.3.3.1 — Фокальные механизмы очагов землетрясений с  $\Delta\sigma \geq 10$ . Для каждого события приводится класс и уровень падения напряжений.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	
ФМ									<i>I</i>
К/ $\Delta\sigma$ , бар	12.7/92	13.4/78	13.3/47	13.7/39	11.2/26	11.0/18	12.3/18	10.9/16	
№	9	10	11	12	13	14	15		
ФМ									
К/ $\Delta\sigma$ , бар	9.5/15	10.5/14	11.0/14	10.2/14	10.2/14	10.3/14	12.0/14		

Коэффициент Лодде-Надаи, угол вида напряженного состояния (омега) и падение напряжений. Для того чтобы получить представление о деформации земной коры в целом, используется коэффициент Лодде-Надаи, который не зависит от координатного представления тензора и может рассматриваться как инвариант. На рисунке 2.3.3-10 представлена карта распределения коэффициента Лодде-Надаи, построенная на основе определения усредненных тензоров деформации, подробно методика описана в работах [Сычева и др., 2005], по данным за 1998-2012гг. (1056 определений механизмов очагов). Анализ значений этого коэффициента показал, что значительная часть исследуемой территории характеризуется деформацией простого сжатия ( $\mu_\sigma > 0,2$ ), и только незначительная часть земной коры находится в условиях простого сдвига ( $-0,2 < \mu_\sigma < 0,2$ ) – западная часть. На эту же карту вынесены землетрясения с  $\Delta\sigma > 10$ . Первая и вторая области активного падения напряжений характеризуется деформацией простого сжатия, для первой зоны значение коэффициента Лодде-Надаи равно 0.73, для второй меняется в пределах 0.9-0.93, третья зона характеризуется деформацией сжатия с присутствием сдвиговой составляющей.

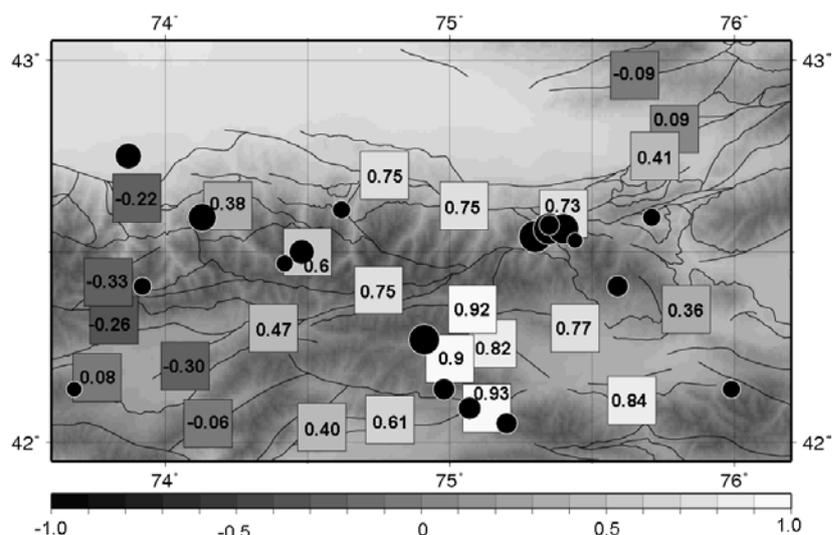


Рисунок 2.3.3-10 – Распределение коэффициента Лоде-Надаи и событий с  $\Delta\sigma > 10$  бар.

Схема классификации режимов СТД [Юнга, 1997] основана на параметризации угловых параметров, одним из которых является угол вида напряженного состояния  $\omega$  [Соколовский, 1969]. Значение этого угла может меняться от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . Площадное распределение значений угла  $\omega$  представлено на рисунке 2.3.3-11, где его значение меняется от  $56^\circ$  до  $102^\circ$ .

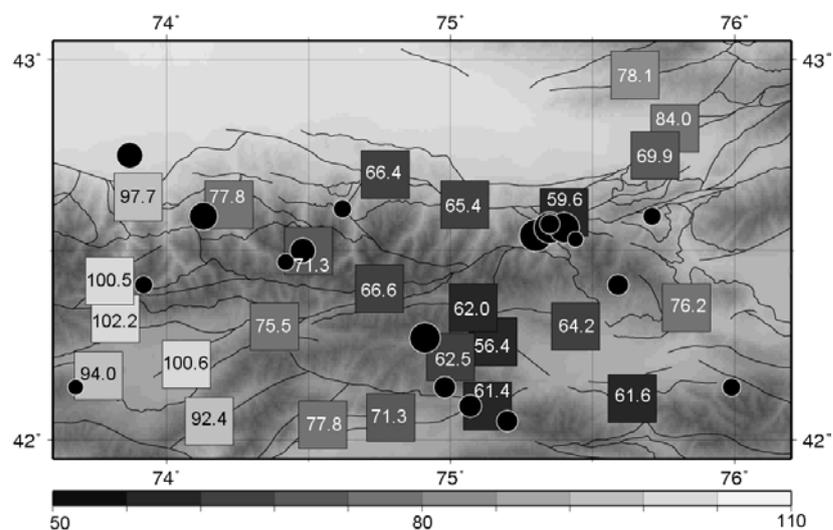


Рисунок 2.3.3-11 – Распределение угла напряженно-деформированного состояния ( $\omega$ ) и событий с  $\Delta\sigma > 10$  бар.

Минимальное значение этого угла, характерно для первой и второй зоны активного падения напряжений, что может свидетельствовать о преобладающих горизонтальных усилиях в этих областях. Согласно полученным результатам первая и вторая зона являются геодинамически активными и требуют детального изучения и мониторинга.

### 2.3.4 Сравнение деформационного поля изменения площади по данным GPS и падение напряжений по сейсмологическим наблюдениям.

На рисунке 2.3.4-1 представлено поле деформации изменения площади построенное на основе сложения горизонтальных компонент тензора деформации, полученного по GPS-данным. Для расчета поля тензора скорости деформации был использован подход, основанный на взвешенном методе наименьших квадратов, предложенный в [Shen et al, 1996]. Аспекты применения этого метода к GPS-данным за 1994-2014 гг. подробно изложены в [Мансуров, 2016].

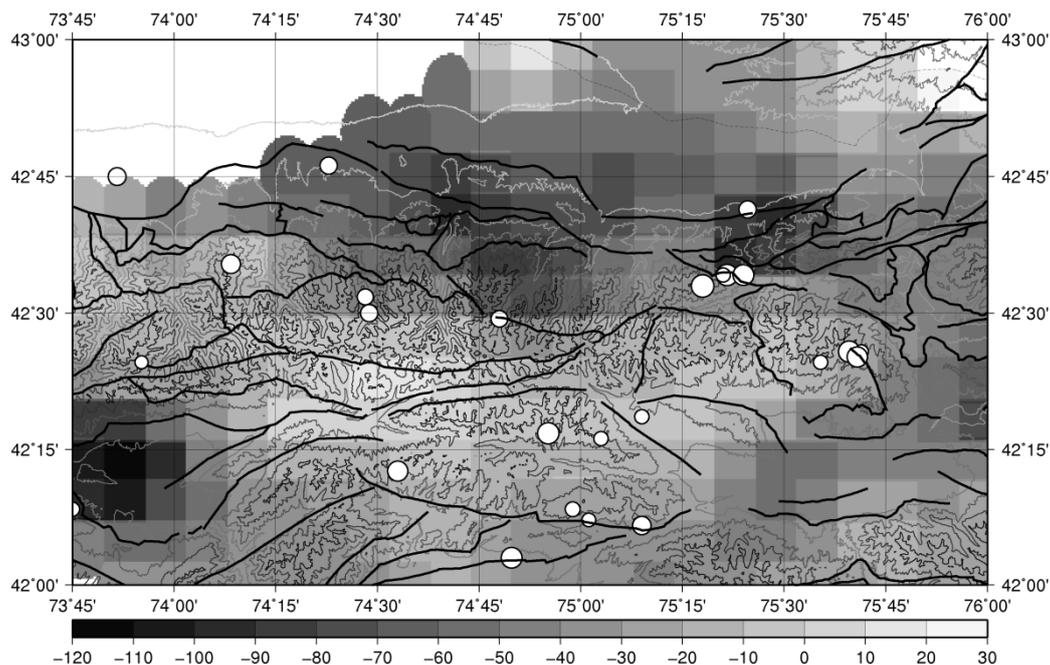


Рисунок 2.3.4-1 – Распределение поля деформации изменения площади по данным GPS и расположение событий с  $\Delta\sigma > 10$  бар (1998-2014 гг.).

На этом же рисунке представлены события с  $\Delta\sigma > 10$  бар, которые произошли на исследуемой территории за 1998-2014 гг. (использовался каталог ДП, который включает данные о 152 событиях). Можно отметить, что эти события попали в область изменения площади от  $-20E-9$  до  $30E-9$  год<sup>-1</sup> и практически отсутствуют в области максимальных значений. Это обстоятельство может свидетельствовать о том, что в области максимальных значений изменения площади отсутствуют землетрясения со значительным сбросом напряжений, что позволяет отнести ее к потенциально опасной и требующей дальнейшего исследования.

### Выводы

В данном разделе проведено массовое определение динамических параметров землетрясений (85 событий), с энергетическим классом  $K=9.5-13.7$ , которые произошли на территории Северного Тянь-Шаня за 1998-2012 годы. Проанализированы зависимости ДП от

магнитуды землетрясения. Сопоставление графиков динамических параметров: радиуса Брюна, скалярного сейсмического момента и падения напряжений в зависимости от магнитуд событий, построенных для трех временных интервалов 1998-2003; 2004-2007; 2008-2012 гг., не выявило существенных различий. Вместе с тем, это продемонстрировало возможность использования таких зависимостей для анализа изменений напряженно-деформированного состояния среды и сейсмического режима. Проведено сравнение полученных результатов с исследованиями других авторов. Определено, что уровень сброшенных напряжений для событий рассматриваемого энергетического диапазона меняется в пределах от  $\sim 1$  до 92 бар. Выделены зоны с наибольшим падением напряжений. Установлено, что события взбросового типа вносят значительный вклад в уровень падения напряжений. Построены совместные карты распределения коэффициента Лодэ Надаи, угла напряженно-деформированного состояния на основе усредненных тензоров деформации по методу СТД и расположения событий с  $\Delta\sigma > 10$  бар, установлена связь между расположением событий и уровнем рассматриваемых полей. Наибольшее падение напряжений отмечено для зон с геодинамическим режимом горизонтального сжатия.

Проведено сравнения уровня падения напряжений с GPS-данными. Выделена область максимальных значений изменения площади, в которой отсутствуют землетрясения с уровнем падения напряжений  $\Delta\sigma > 10$  бар.

### **3 Разработка программных средств систематизации и методов обработки данных геодезических наблюдений для геодинамического анализа**

Наиболее затратным, объемным, технологически сложным видом геодезических наблюдений на территории Бишкекского геодинамического полигона являются регулярные GPS измерения. Поэтому в целях оптимизации и ускорения процесса обработки GPS данных осуществляется разработка соответствующих методов и программных средств. Одним из направлений такого рода деятельности является структуризация и автоматизация процесса хранения и доступа к геодезическим данным, в частности к информации по GPS измерениям.

В ИС РАН База данных GPS наблюдений Центрально-Азиатского региона (БД GPS) стала функционировать с 2011 г. Роспатентом от 10.07.2013 выдано Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013620819 "База данных GPS наблюдений Центрально-Азиатской сети", авторы сотрудники ИС РАН: С.И. Кузиков, А.М. Гражданкин. В настоящее время БД устоялась в своей конфигурации и успешно работает в эксплуатационном режиме для получения информации, при планировании полевых GPS работ, а также для обработки данных. Ежегодно силами сотрудников ИС РАН она пополняется новой информацией, и лишь иногда происходят незначительные усовершенствования в БД. В дальнейшем планируется добавление в БД таблиц по результатам обработки GPS информации.

В текущем году продолжилась разработка алгоритма и программы по объединению временных рядов координат отдельных марок одного пункта, или для группы компактно расположенных пунктов, которые могут быть рассмотрены как расположенные в пределах жесткого блока. Необходимость этих работ основана на том, что процесс обработки данных GPS измерений в GAMIT/GLOBK до получения векторов скорости и временных рядов координат требует существенных затрат труда и времени. Но после получения единого решения всегда остается до сотни проблемных марок или пунктов (см. раздел 2.2), которые после небольших дополнительных расчетов могут быть включены в набор данных для последующего геодинамического анализа. Однако оперативно исправить все выявленные ошибки через повторный пересчет затруднительно. В этих случаях могут помочь разрабатываемые нами алгоритмы и программы для оперативных пересчетов координат и векторов скорости на основе временных рядов координат, уже рассчитанных в результате единого решения в GAMIT/GLOBK.

Во втором разделе главы, речь пойдет об алгоритмах обработки данных линейно-угловых наблюдений. Здесь основная проблема также заключается в том, что уровень интересующих нас современных движения земной коры не многим выше уровня ошибок измерений данного метода. Повышение точности временных рядов более четко сможет обозначить тенденции относительных

смещений. Здесь речь идет только о возможности численной обработки данных, без изменения технологии измерений и приборной базы.

### 3.1 Алгоритм и программа объединения временных рядов координат GPS марок одного пункта.

Лаборатория GPS ИС РАН ежегодно осуществляет только один полный цикл обработки собственных данных полевых наблюдений с 1994 по текущий год (>20 лет) для ~700 пунктов (~1600 марок). Технология расчета кроме собственных данных наблюдения требует использование данных еще ~600 перманентных станций IGS (~1100 марок). При этом очень важно для всех векторов скорости и рядов координат получить единое решение, т.е. в один цикл расчета, тогда можно добиться максимальной точности для параметров относительного движения пунктов на исследуемой территории. После получения единого решения, как правило, остаются проблемные марки и пункты, для которых возникает необходимость оперативного исправления ошибок.

В соответствующем разделе прошлогоднего отчета речь шла о преобразовании геоцентрических (картезианских XYZ) в топоцентрические координаты (NEH) для исследуемых марок одного пункта или для разных пунктов (рис. 3.1-1).

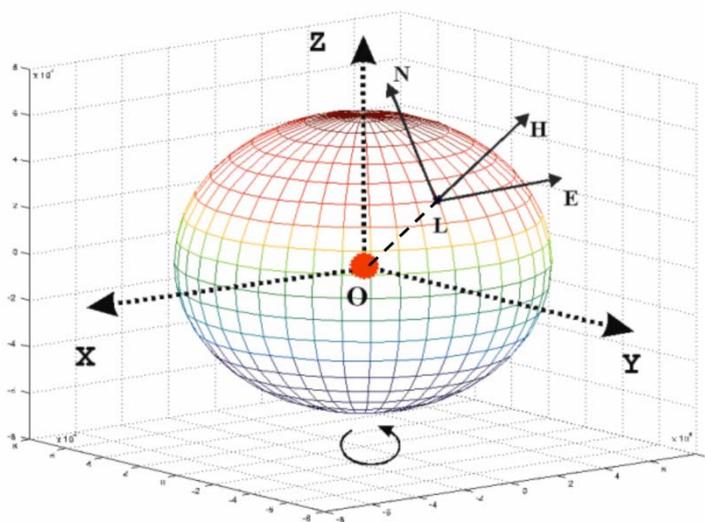


Рисунок 3.1-1 – Пространственное соотношение геоцентрических картезианских координат XYZ и топоцентрических NEH.

Причем для целей наших построений нет необходимости использовать координаты NEU с привязкой к поверхности эллипсоида, достаточно знать  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  и на их основе рассчитать NEH, т.е. ось N проходит через центр масс Земли. Для территории Центральной Азии отличия по вертикальной координате  $u_i$  и  $h_i$  составляет сотые доли миллиметра. Таким образом, переход от геоцентрических координат к локальным топоцентрическим прямоугольным координатам алгоритмически обозначен. Теперь при обнаружении ошибок включения в выборку ВРК

некорректных данных можно их корректировать для каждой марки в отдельности с последующим пересчетом прямолинейного тренда. Подпрограммы таких расчетов на языке PERL уже созданы и отработаны. Но пока остается задача поиска критерия для оценки качества выборки для автоматической проверки ВРК всех марок, и научить алгоритм распознавать и чистить неблагополучные значения в рядах координат.

Следующим шагом, вытекающим из вышеописанного решения, является совместное преобразование координат для нескольких марок одного пункта. Дело в том, что бывают случаи, когда марки продолжительного измерения уничтожаются и наблюдения переносятся на запасные марки, а ВРК желательно рассматривать единым. При этом необходим алгоритм объединения рядов координат. Поскольку марки одного пункта расположены достаточно близко друг к другу, то можно рассматривать их нахождение в пределах жесткого или квазижесткого тела. Из нескольких возможных вариантов такой процедуры объединения ВРК мы остановились на выделении марки с наиболее представительным ВРК (по продолжительности и количеству измерений). Естественным образом, на пункте должно быть не менее 3-х измерений и как минимум на одной марке должно быть 2 измерения. Для этого предложен эмпирически подобранный критерий:

$$Cr = \Delta T + \ln(qm) + \log(\Delta T / qm), \quad (3.1)$$

где  $\Delta T$  – интервал измерений марки (годы),  $qm$  – количество измерений марки.

Т.к. в движении марки (пункта) мы ищем линейную скорость, то опираться следует на прямолинейный тренд (формулу типа  $y=a+bx$ ) для координаты одной из марок. Необходимо рассчитать коэффициенты линейного тренда для каждой координаты марки с максимальным значением критерия  $Cr$ . Для другой марки пункта рассчитываются средние значения дат измерений  $avrD$  и координаты  $avrX$ . По линейному тренду основной марки находим значение  $Xc$  со значением  $avrD$ . Прибавляем к значениям  $Xi$  второстепенной марки величину  $(Xc - avrX)$ . Для нового общего ряда координат рассчитываем новый линейный тренд, скорость и регулярные отклонения измеренных значений от тренда. Пока идет процесс апробации алгоритма и программы, на его основе построенной.

### **3.2 Разработка алгоритма уравнивания данных прямых и обратных линейно-угловых измерений**

Нами проводятся режимные линейно-угловые измерения (ЛУИ) на детальных геодезических площадках с 2006 г. При этом формируется банк данных с записью таких основных параметров как имени базовой линии (БЛ), даты измерения, дальности, вертикального и горизонтального углов. Актуальность ЛУИ определяется тем, что космогеодезические измерения

не могут сейчас в полном объеме обеспечить все потребности геодинимических наблюдений за современными движениями земной коры. Так на дистанциях до 2-3 км наземные геодезические методы позволяют более оперативно и более точно определить относительное изменение позиций реперов друг относительно друга.

На Бишкекском геодинимическом полигоне ЛУИ проводятся на электронных тахеометрах Leica TC-2003 и TS-09 с записью основных характеристик измерения в памяти прибора. К настоящему времени полученных посредством ЛУИ данных накоплен большой объем. Файлы (\*.GSI) полевых измерений хранятся с структурированным архиве. Проблема первичной автоматической верификации и корректировки данных ЛУИ успешно решена уникальной программой "GSI-Checker", описание которой приводилось в прошлогоднем отчете. Программа может создать набор статистических данных по каждой из БЛ, и способна ее распознать, даже если у нее в одном из файлов будет отсутствовать имя или будет присвоено имя другой линии. Сейчас стоит остро вопрос первичной обработки данных ЛУИ, а именно уравнивание или увязка прямых и обратных измерений для одной БЛ.

При проведении ЛУИ исторически сложилась следующая ситуация. В нижних частях тахеометра и отражателя крепятся заводские трегеры, которые устанавливаются на измеряемые марки и обеспечивают горизонтальное-вертикальное положение тахеометра и отражателя. При проведении массовых линейно-угловых замеров настройка трегеров требует определенных навыков и затрат времени. Поэтому для ускорения процесса ЛУИ геодезических площадок БПП с 2006 г используются укороченные втулочные основания для отражателей, которые изготовлены в НС РАН. Избежать трегерной настройки тахеометра пока не представляется возможным. Высота приведенного к горизонту трегера чаще всего составляет 235 мм, а высота втулочного основания – 120 мм. Систематическое превышение в 115 мм визирной оси тахеометра над отражателем несколько усложняет ситуацию, т.к. дальности и вертикальные углы прямых и обратных измерений в общем случае не равны (рис. 3.2-1).

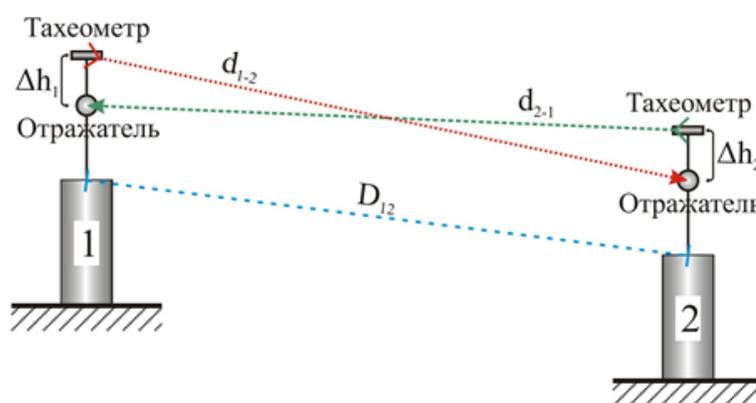


Рисунок 3.2-1 – Типичное соотношение длин прямого ( $d_{1-2}$ ), обратного ( $d_{2-1}$ ) измерений и оцениваемого расстояния ( $D_{12}$ ) между реперами центрировочных столиков двух монументов при наличии разности высот тахеометра и отражателя ( $\Delta h_1, \Delta h_2$ ).

Но при этом помимо оперативности монтажа отражателя, втулка обеспечивает более надежную повторную его установку в одну и ту же позицию, сокращает возвышение визирной оси отражателя от опорной точки центрировочного столика, тем самым уменьшает ошибки отклонения столика от горизонтальной плоскости. При этом увеличилось число параметров, которые могут влиять на результаты измерений за один цикл ЛУИ (рис. 3.2-2).

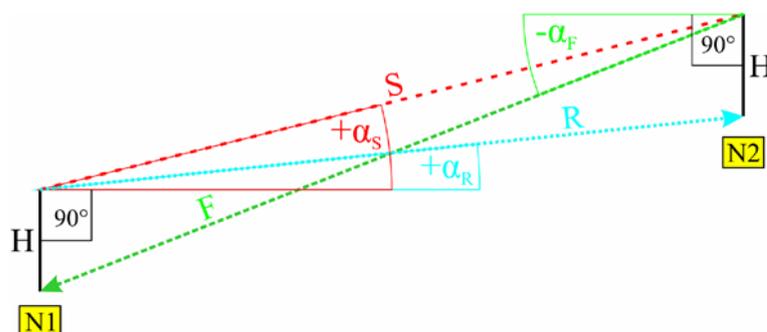


Рисунок 3.2-2 – Типичное соотношение линейно-угловых величин при прямом и обратном измерениях БЛ, где:

$N1, N2$  – номера геодезических реперов;  $H$  – превышение ( $\sim 115$  мм) тахеометра над отражателем;  $F$  – длина БЛ, измеренная в произвольно первичном (прямом) направлении;  $\pm\alpha F$  – угол вертикальный БЛ от горизонта при первичном измерении;  $R$  – Длина БЛ, измеренная в обратном направлении;  $\pm\alpha R$  – угол вертикальный БЛ от горизонта при обратном измерении;  $S$  – длина БЛ опорная (искомая);  $\pm\alpha S$  – угол вертикальный от горизонта (искомый) для опорной БЛ.

При этом априорно известны ориентировка в пространстве и величина значения  $H$  (115 мм), величины  $F, \alpha F, R, \alpha R$  поставляются из прямых и обратных линейно-угловых измерений. На первый взгляд для определения  $S$  и  $\alpha S$  каждой БЛ для цикла достаточно их вычислить из 2-х наборов данных ( $H, F, \alpha F$ ) и ( $H, R, \alpha R$ ), а потом найти их среднее. Однако иногда по тем или иным причинам один из параметров  $F, \alpha F, R$  или  $\alpha R$  для одного цикла заметно отличается от такого же параметра противоположенного направления. А анализ временного ряда ближайших по времени измерений этого параметра также показывает экстремальный его всплеск (например, табл. 3.2.1).

Таблица 3.2.1 – Примеры экстремальных значений длин и вертикальных углов, проявленных только при измерении в одном из направлений, для базовых линий (БЛ) геодезической площадки POLIGON.

БЛ	P0-1		P1-0		P0-5		P5-0		
	Дата	L, мм	VA, °	L, мм	VA, °	L, мм	VA, °	L, мм	VA, °
	15.01.2013	660103.9	-11.02140	660056.2	11.00442	1183729.3	-14.39781	1183668.5	14.38893
	08.02.2013	660101.8	-11.02336	660056.0	11.00073	1183728.5	-14.40040	1183670.2	14.38474
	15.02.2013	660106.0	-11.02581	660057.0	11.00453	1183733.9	-14.39849	1183671.2	14.38316
	01.03.2013	660121.9	-11.02787	660055.7	11.00884	1183747.6	-14.40190	1183668.0	14.38877
	12.03.2013	660103.5	-11.02267	660056.4	10.99736	1183728.7	-14.40007	1183668.2	14.38385
	20.03.2013	660106.2	-11.02505	660057.9	11.00642	1183730.7	-14.39855	1183669.8	14.38768

В таблице одним цветом показаны сравниваемые столбцы параметров разнонаправленных измерений для одной БЛ, красным шрифтом выделены экстремальные значения параметра с течением времени. Средний уровень параметра одного направления измерений отличается от среднего уровня обратного направления согласно рисункам 3.2-1 и 3.2-2. Для повышенных значений длин, на 15-20 мм относительно среднего по ряду, для 2-х БЛ в направлении измерений с одного пункта "0", сложно дать однозначное объяснение. Но нами было замечено, что при значительных превышениях для 2-х измеряемых реперов и повышенных значениях вертикального угла в холодное (или туманное) время года наблюдается эффект рассеивания или отражения (вплоть до полной потери) сигнала в воздухе **при измерениях вниз**. Тогда как измерение вверх позволяет получить нормальный результат в статистических пределах (таблица 3.2.1).

Одностороннее отклонение результата измерения не геодинамического характера может встречаться время от времени, создавая ложные аномалии. При этом возникает желание исключить или уменьшить такие экстремумы параметра. Ведь в этом случае среднее арифметическое прямых ( $SF$ ,  $\alpha SF$ ) и обратных ( $SR$ ,  $\alpha SR$ ) измерений будет содержать в себе как минимум половину ошибочно завышенного значения, которое может интерпретироваться как факт подвижности реперов. В условиях большого объема базовых линий и длительного временного ряда ЛУИ решить эту проблему разбраковки односторонних всплесков параметра может только соответствующий алгоритм и программное обеспечение. Задачи исключения ложных экстремумов и увязка избыточных геодезических измерений являются едва ли не самыми важными в области анализа геодезической информации.

Для решения этой проблемы в 2016 году нами был разработан усовершенствованный алгоритм, основанный на расчете опорных длины и вертикального угла ( $S$  и  $\alpha S$ , рис. 3.2-2) 10-ю вариантами. Где величина превышения тахеометра над отражателем  $H$  служит эталоном и критерием валидности каждого из измеренных параметров. Следует упомянуть, что предложенный в прошлом году алгоритм фильтрации 10 вариантов расчета  $S$  и  $\alpha S$ , основанный на критерии  $t$ -статистики Стьюдента не оправдал полностью ожиданий по исключению ложных экстремумов. Поэтому в текущем году приобрела актуальность другая последовательность действий.

Для примера рассмотрим одно из линейно-угловых измерений 06.12.2012 на площадке KENTOR по самой длинной линии  $K3=5$ . При этом в одном направлении измерены длина  $F = 2453507.53$  мм и вертикальный угол  $Af = 4.26872^\circ$ , а в обратном направлении – длина  $R = 2453532.15$  и вертикальный угол  $Af = -4.27436^\circ$ . Особенность этих данных заключается в излишне низком значении длины прямого измерения  $F$  по сравнению с временным рядом ближайших по времени измерений. Все остальные измеренные параметры в меньшей степени отличаются от ближайших значений по временному ряду. Согласно рисунку 3.2-2 по имеющимся 4-м

измеренным данным и  $H = 115$  мм можно каждый из этих параметров рассчитать через три известных величины. Таких сочетаний по три параметра можно составить 10. Но как упоминалось ранее, на сочетании исходных данных H-Af-Ar (превышение и два вертикальных угла) вычисленная длина линии может давать ошибку в сотню метров. Таким же образом сочетание параметров H-F-R (превышение и две длины) соответственно с большой ошибкой вычисляются вертикальные углы. Поэтому эти два варианта вычислений нами не рассматриваются. Таким образом, в таблице 3.2.2 приводятся 8 вариантов проверочных расчетов параметров на основе трех измеренных величин.

Таблица 3.2.2 – Проверочные расчеты параметров на основе трех величин линейно-угловых измерений (06.12.2012) на площадке KENTOR для линии КЗ=5.

№ п/п	Параметры для расчета	Рассчитанные параметры		Разность между рассчитанным и измеренным параметрами		Рассчитанные параметры		Разность между рассчитанным и измеренным параметрами	
1	H-F-Af	Rc, мм	2453524.660	dR, мм	-7.489	Arc, °	-4.274076	dAr, °	0.000283
2	H-R-Ar	Fc, мм	2453515.018	dF, мм	7.488	Afc, °	4.269003	dAf, °	0.000283
3	H-F-Ar	Rc, мм	2453524.661	dR, мм	-7.488	Afc, °	4.269003	dAf, °	0.000283
4	H-R-Af	Fc, мм	2453515.019	dF, мм	7.489	Arc, °	-4.274076	dAr, °	0.000283
5	F-R-Af	Hc, мм	165.232	dH, мм	50.232	Arc, °	-4.276415	dAr, °	-0.002055
6	F-R-Ar	Hc, мм	165.311	dH, мм	50.311	Afc, °	4.266660	dAf, °	-0.002059
7	F-Af-Ar	Hc, мм	121.094	dH, мм	6.094	Rc, мм	2453525.569	dR, мм	-6.580
8	R-Af-Ar	Hc, мм	121.094	dH, мм	6.094	Fc, мм	2453514.110	dF, мм	6.580

Принципиальный интерес таких расчетов заключается в том, что по последним 4 вариантам значений  $dH = Hc - H$  можно определить уровень отклонения исходной тройки измеренных параметров относительно эталонного значения  $H = 115$  мм. Также здесь можно определить, где скрывается наибольшая ошибка измерения в длинах или вертикальных углах. Кроме того, в первых 4-х строках расчетов средние значения dR и dF, dAr и dAf формируют поправки к одному из значений длины и вертикального угла. После прибавления этих поправок к одному из соответствующих значений длины и вертикального угла геометрическая система рисунка 3.2-2 полностью отвечает норме длин и углов, а геодезические измерения становятся увязанными.

Но при этом возникает проблема выбора одной из измеренных длин (R или F) и вертикальных углов (Ar или Af). Т.к. из представленных величин и многих других нам не удалось обнаружить признаки, которые смогли бы указать на этот правильный выбор корректируемого параметра. Поэтому в автоматическом режиме можно сделать коррекцию в сторону ошибочного измерения, т.е. исправить в худшую сторону более верное измерение длины или вертикального угла относительно временного ряда. В связи, с чем для корректного измеренного параметра

требуется какой-то внешний критерий, лежащий за пределами одного цикла прямых и обратных линейно-угловых измерений базовой линии.

Чтобы этот критерий был максимально универсальным, предлагается использовать в качестве ориентира средние значения для R, F, Af, Ar за весь временной интервал измерений или за какой-либо временной период. В этом случае все невязки одного цикла (dR, dF, dAf, dAr) будут исправляться в сторону этого среднего, и сократиться лишний шум в вариациях этих параметров. Но если 3 или 4 измеренных параметра покажут некоторую увязанную геометрическую аномалию, то она обязательно сохранится и в исправленных значениях.

Например, для вышеупомянутой БЛ КЗ=5 средние измеренные параметры, без аномальных значений и после геометрической увязки, представляют собой  $F_a = 2453517.56$  мм,  $A_{fa} = 4.26305^\circ$ ,  $R_a = 2453534.67$ ,  $A_{ra} = -4.26841^\circ$ . Соответственно разность между средними и измеренными значениями будет:  $dF_a = 10.03$  мм,  $dA_{fa} = -0.00567^\circ$ ,  $dR_a = 2.52$  мм,  $dA_{ra} = -0.00595^\circ$ . Теперь если суммировать модули отклонений по длинам отдельно и углов отдельно, а затем нормировать на эти суммы модули отдельных длин и углов, то получим:  $ndF = 0.799$ ,  $ndA_f = 0.488$ ,  $ndR_a = 0.201$ ,  $ndA_r = 0.512$ . Это поправочные коэффициенты умножения для средних значений dR, dAf, dF, dAr в первых 4-х строках таблицы 3.2.2. Таким образом, исправленные значения для БЛ КЗ=5 за 06.12.2012 будут следующими:

$$cF = F + dF \times ndF = 2453513.52 \text{ мм}, cA_f = A_f + dA_f \times ndA_f = 4.26886^\circ,$$

$$cR = R + dR \times ndR = 2453530.646 \text{ мм}, cA_r = A_r + dA_r \times ndA_r = -4.27421^\circ.$$

Используя эти увязанные (скорректированные) значения длин и вертикальных углов прямых и обратных измерений БЛ КЗ=5 можно вычислить опорные расстояние и вертикальный угол (рис. 3.2-2) на основе любого варианта сочетаний параметров из таблицы 3.2.2. Отличия в длинах для разных вариантов расчета будут в пределах сотых и тысячных долей миллиметра, для угловых величин отличия будут в пределах  $10^{-7}$  градуса. В итоге искомая опорная длина БЛ составит  $S = 2453522.08$  мм и опорный вертикальный угол будет  $sA = 4.27154^\circ$ .

Такой алгоритм увязки прямых и обратных линейно-угловых измерений одного цикла проверен на нескольких базовых линиях и реализован в виде тестовой программы на языке PERL. Опять же без достаточного количества расчетов на реальных данных и их проверки гарантировать полную фильтрацию всех случаев ложных аномальных значений пока нельзя. Но если практическая проверка данного алгоритма даст положительные результаты на всех БЛ всех площадок, то можно будет завершить процесс поиска вариантов увязки прямых и обратных измерений БЛ. Тогда можно будет перейти к пространственной увязке параметров по всем БЛ площадки за один цикл измерений с переходом к трехмерным локальным координатам.

#### 4 Изучение режима деформации на сегментах разломов по данным комплексных геодезических наблюдений на детальных площадках

На геодезических площадках POLIGON, KENTOR и ALMALY (рис. 4-1) с июня 2012 г и по настоящее время регулярно проводятся комплексные геодезические наблюдения за режимом деформирования.

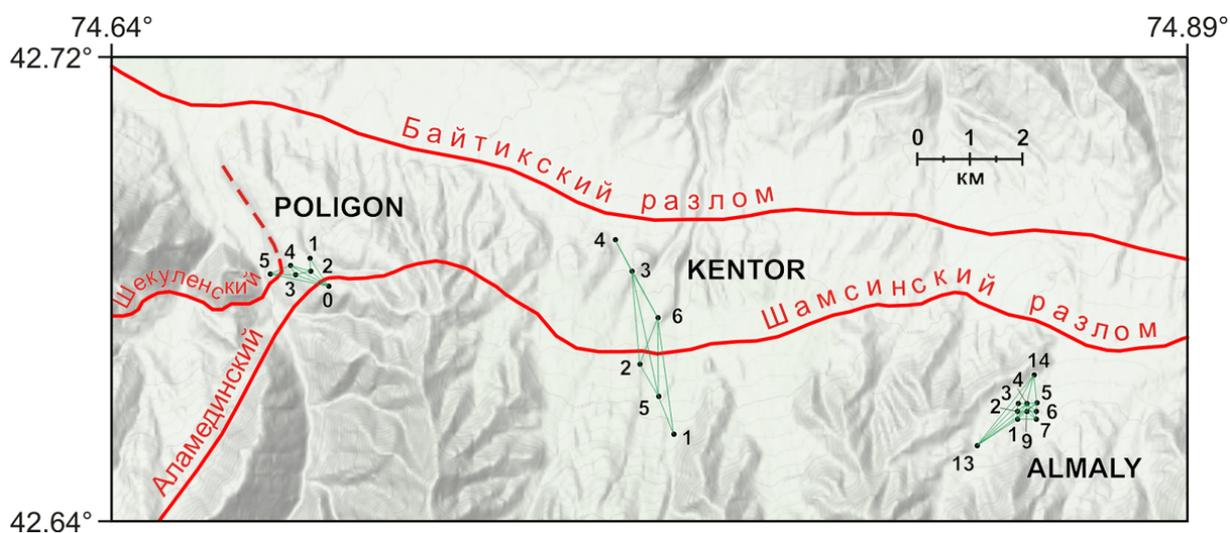


Рисунок 4-1 – Положение геодезических площадок POLIGON, KENTOR и ALMALY относительно активных разломов (красные линии). Зеленым цветом показаны базовые линии линейно-угловых измерений. Точки и числа – фундаментальные реперы и их номера.

Положение площадок приурочено к отдельным участкам активных разломов в пределах Бишкекского геодинамического полигона. Территория исследования расположена в подножии северного склона Киргизского хребта (Центральный Тянь-Шань). Первоначальная цель данных работ заключалась в проверке предположения о том, что зоны активных разломов земной коры могут выступать в качестве ослабленных сегментов земной коры, где более отчетливо проявляются деформации. При этом появилась возможность исследовать вопрос о возможной зависимости характера движений на площадках вдоль и вкрест простираения зоны разлома, относительно сторон света. Немаловажным здесь будет и сравнение исследуемых геодезических параметров с данными других геолого-геофизических направлений.

В главе приводятся данные линейно-угловых, нивелировочных и GPS измерений, полученные с июня 2012 г по октябрь 2016 г на трех детальных геодезических площадках. Площадки удалены друг от друга в широтном направлении на расстоянии от 6 до 14 км, и приурочены к линии широтного Шамсинского активного разлома. Каждая площадка оснащена фундаментальными реперами, отстоящими друг от друга на расстоянии от 150 м до 2.5 км.

Основным инструментом наблюдения на геодезических площадках являются еженедельные линейно-угловые измерения (ЛУИ). На каждой площадке ЛУИ проводится с фиксацией (помимо

прочих параметров) наклонной дальности для базовой линии (БЛ), вертикального угла, и горизонтального угла между 2 линиями с одним общим репером. Каждая БЛ за один цикл измеряется в двух направлениях с разницей от 5-10 минут (при работе 2-мя тахеометрами) до 2-3 часов (при работе 1-м тахеометром). Прямое и обратное ЛУИ одной БЛ на площадках НС РАН осуществляются с временной разницей от 5-10 минут (при измерении 2-мя тахеометрами) до 2-3 часов (при измерении 1-м 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, или 20 записей с одиночным замером параметров. По каждому циклу опроса площадки в памяти тахеометра формируется один или несколько файлов в формате \*.GSI.

Нивелирование площадок служит для заверки вертикальной компоненты движения базовых реперов, и на каждой площадке планируется проводить 2 раза в год. В пределах сегмента профиля между основными бетонными реперами установлены железные костыли через 25-40 м, обозначающие позиции реек. Каждый сегмент нивелирного профиля промеряется в двух направлениях. Данные измерений по каждой позиции нивелира записываются в его память. По каждому проходу сегмента в одну сторону формируется файл в формате \*.GSI и прибор вычисляет итоговое превышение, которое и является искомым параметром.

Для GPS измерений на детальных площадках используются те же репера, что и для линейно-угловых наблюдений. Данные GPS измерений проводятся 4 раза в год на 10 реперах площадок POLIGON и KENTOR, на площадке ALMALY 4-е GPS станции работают непрерывно. Координаты реперов, полученные на основе GPS измерений, служат для пространственной привязки всей системы реперов данной площадки, а также для сопоставления данных, полученных разными геодезическими методами. Первичные данные хранятся в иерархически упорядоченной файловой структуре, которая привязана к базе данных GPS наблюдений, содержащей всю необходимую справочную информацию.

Нивелирование и GPS измерения составляют сравнительно небольшой объем работ и носят проверочный характер.

#### **4.1 Данные линейно-угловых наблюдений**

В рамках деформационных наблюдений за сегментами активных разломов ЛУИ являются основным инструментом исследований. В результате еженедельного цикла ЛУИ для каждой площадки формируется один верифицированный GSI-файл, который имеет унифицированное имя и содержание. Полевые GSI-файлы сначала проходят процедуру верификации при помощи программы "GSI-Checker" (авторская разработка сотрудников НС РАН). Затем в "ручном" режиме просматриваются журналы автоматических исправлений и рекомендаций по отмеченным проблемным ситуациям, которые не удалось исправить программе автоматически. Из программы

GSI-Checker все наклонные дистанции и вертикальные углы БЛ данной площадки преобразуются в табличный формат XLS. Для обеспечения возможности сравнения единичные пропуски в данных заполняются по принципу интерполяции с учетом прямых и обратных измерений. Скорректированные и заполненные вновь данные составляют не более 5 % от общего объема. Пока не закончен процесс написания программного кода по увязке прямых и обратных ЛУИ, далее в "ручном" режиме анализируются и исправляются значимые расхождения в данных прямых и обратных измерений по алгоритму поиска всплесков разности между значениями двусторонних наблюдений с опорой на данные ближайших наблюдений. В итоге данной процедуры фильтрации и коррекции были получены временные ряды усредненных дальностей для всех БЛ площадок.

### ***Площадка POLIGON.***

На текущий момент времени для 11 БЛ площадки были проанализировано 204 цикла измерений с 04.05.2012 по 27.10.2016. По отношению к данным, представленным в прошлогоднем отчете на октябрь 2015г, существенных деформационным возмущений для БЛ площадки POLIGON не отмечается. Показательным в этом отношении может служить график вариаций длины БЛ пересекающей всю площадку и являющейся здесь самой длинной (рис. 4.1-1).

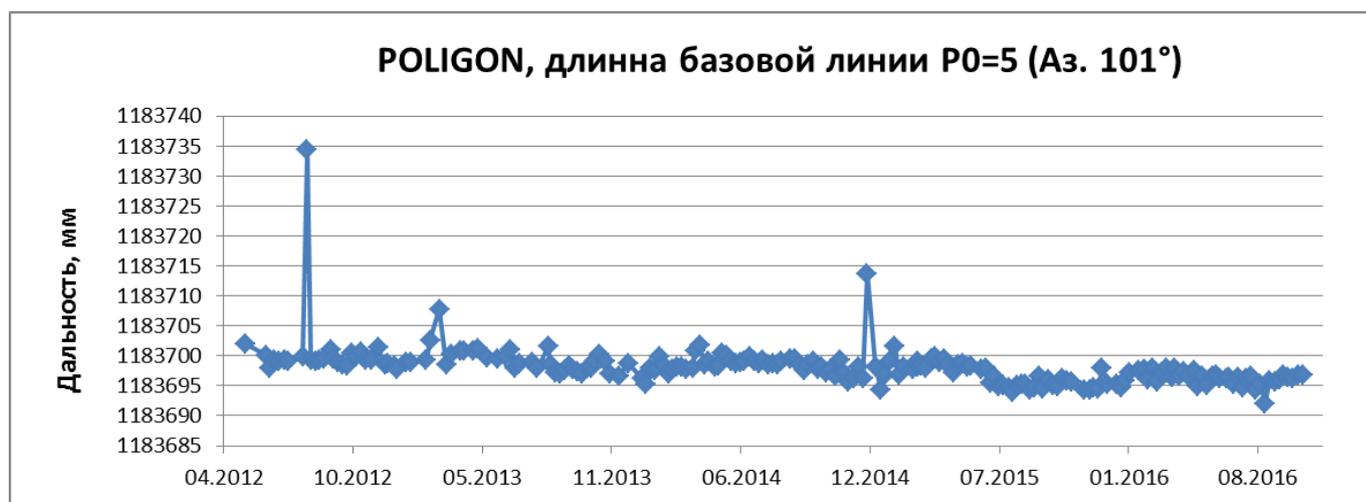


Рисунок 4.1-1 – Характер вариаций длины для самой длинной БЛ площадки POLIGON.

Экстремальные всплески длин БЛ были охарактеризованы ранее. Также ранее отмечались и низкочастотные волны тренда, связанные с сезонными вариациями. Для более коротких линий площадки отмечается более ровный фон тренда (рис. 4.1-2).

Длительность наблюдений за БЛ геодезических площадок составляет уже более 4 лет, поэтому интерес для анализа представляет и фоновые вариации длин БЛ при более детальном рассмотрении. Для увеличения детальности вертикальной шкалы – вариации длин, удалим из рядов дни измерений, на которые приходятся всплески более чем на 5 мм длины относительно ближайших дней.



Рисунок 4.1-2 – Характер вариаций длины БЛ P2=3.

При этом более отчетливо проявится волнообразный характер вариаций длин и наклон тренда, который дает скорость удлинения-укорочения (рис. 4.1-3).



Рисунок 4.1-3 – Характер вариаций длины БЛ P4=5 без экстремальных значений (>5 мм относительно ближайших измерений). Скорость укорочения БЛ  $\approx -1.26$  мм/год, или скорость деформации  $\approx -2.87E-6$  год<sup>-1</sup>.

Кроме случаев укорочения БЛ на площадке POLIGON отмечаются тенденции удлинения (например, рис. 4.1-4).



Рисунок 4.1-4 – Характер вариаций длины БЛ P0=4 без экстремальных значений. Скорость удлинения БЛ  $\approx 1.19$  мм/год, или скорость деформации  $\approx 1.38E-6$  год<sup>-1</sup>.

Тенденции ежегодного удлинения-укорочения для БЛ площадки POLIGON можно свести в табличной форме следующим образом (табл. 4.1.1).

Таблица 4.1.1 – Скорости изменения длины и деформации для БЛ площадки POLIGON.

Параметры	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 <sup>-1</sup>	0.348	1.695	0.769	1.384	-1.174	3.633	-3.447	0.519	1.060	-2.213	-2.870

Из табличных данных следует, что скорость изменения длин БЛ площадки POLIGON варьирует по модулю от 0.21 до 1.26 мм/год. Скорость деформации удлинения изменяется от 0.35 до 3.63 (в среднем  $1.344 \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>). Удлинению подвержены 7 БЛ с простираниями от 107 до 178° (в среднем – 134°), максимальное удлинение приходится на 178°. При этом 4 БЛ из 11 имеют тенденцию укорочения со скоростью  $< -1$  мм/год и скоростью деформации  $-1.17 \div -3.45$  (в среднем  $-2.426 \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>). 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°.

Из опыта прошлогоднего анализа следует, что даже достаточно объемные временные ряды длин БЛ с экстремальными значениями (в несколько раз больше фоновых) способствуют высокому уровню парных коэффициентов корреляции (КК мин. – 0.45, средний – 0.77, максимальные –  $> 0.9$ ). Из чего следует необходимость удаления экстремальных значений длин БЛ из временных рядов для целей корреляционного анализа. Для этого вполне подходит процедура,

предложенная выше – удаление экстремальных значений  $>5$  мм относительно 2-х ближайших измерений. В результате чего для БЛ площадки POLIGON получились следующие корреляционные зависимости (табл. 4.1.2).

Таблица 4.1.2 – Парные коэффициенты корреляции между выборками временных рядов длин БЛ площадки POLIGON с 12.06.2012 по 27.10.2016, 194 измерения без экстремальных значений ( $>5$  мм относительно ближайших измерений).

БЛ	P0=1	P0=2	P0=3	P0=4	P0=5	P1=2	P2=3	P2=4	P3=4	P3=5	P4=5
P0=1	1	0.62	0.77	0.54	0.20	0.47	-0.01	0.25	0.01	-0.26	-0.34
P0=2	0.62	1	0.83	0.69	-0.27	0.73	-0.53	0.13	0.04	-0.69	-0.69
P0=3	0.77	0.83	1	0.70	0.02	0.64	-0.27	0.25	0.05	-0.49	-0.51
P0=4	0.54	0.69	0.70	1	-0.15	0.66	-0.30	0.75	0.64	-0.46	-0.76
P0=5	0.20	-0.27	0.02	-0.15	1	-0.53	0.76	0.13	-0.06	0.75	0.50
P1=2	0.47	0.73	0.64	0.66	-0.53	1	-0.66	0.18	0.24	-0.81	-0.67
P2=3	-0.01	-0.53	-0.27	-0.30	0.76	-0.66	1	0.22	0.04	0.75	0.45
P2=4	0.25	0.13	0.25	0.75	0.13	0.18	0.22	1	0.83	0.03	-0.49
P3=4	0.01	0.04	0.05	0.64	-0.06	0.24	0.04	0.83	1	0.00	-0.36
P3=5	-0.26	-0.69	-0.49	-0.46	0.75	-0.81	0.75	0.03	0.00	1	0.76
P4=5	-0.34	-0.69	-0.51	-0.76	0.50	-0.67	0.45	-0.49	-0.36	0.76	1

Таким образом, из всех временных рядов длин БЛ были исключены только 10 измерений (5%), где присутствовали экстремальные значения длин ( $>5$  мм относительно ближайших измерений). При этом произошло существенное количественное изменение в корреляционной таблице, максимальные положительные значения опустились до 0.83 и появились максимальные отрицательные значения до -0.81. Хотя сохранилась общая структура связей – наибольшие положительные корреляции несколько уменьшились, а минимальные положительные трансформировались в отрицательные значения. Но строгой закономерности в такой трансформации нет.

Итоговый смысл приведенной выше корреляционной таблицы сводится к пониманию линейных зависимостей между фоновыми трендами изменения длин БЛ площадки POLIGON. Но в представленном виде (даже с цветовым выделением повышенных значений) детально разобраться в структуре линейных зависимостей не совсем просто. Поэтому для упрощения структуры применим процедуру свертывания корреляционной таблицы, через объединение столбцов и строк таблицы начиная с максимального положительного значения корреляции. При этом в объединенном столбце (и строке) для других БЛ (или их кластеров) присваиваются средние значения КК объединяемых БЛ (или их кластеров). Свертывание таблицы по максимальному значению КК продолжается до того, пока максимальное положительное значение КК во всей таблице не опустится до некоторого установленного уровня. В данном случае нами принят

уровень 0.62 – как приближенное значение "золотого сечения". В качестве обоснования этого уровня можно привести большое количество тестовых распознаваний зашумленных кластерных структур, при которых зашумленная структура идентифицируется уверенно, если она повторяет идеальную модель на >60% [Кузиков, 2007; Кузиков, Мухамедиев, 2010].

В результате свертывания корреляционная таблица 4.1.2 примет вид:

Таблица 4.1.3 – Коэффициенты корреляции между кластерами БЛ площадки POLIGON, построены на основе свертывания таблицы 4.1.2.

БЛ	$0=2+0=3(.83)+0=1(.70)$	1=2	$0=5+2=3(.76)$	$2=4+3=4(.83)+0=4(.69)$	$3=5+4=5(.76)$
Кластеры БЛ	I		II	III	IV
$0=2+0=3(.83)+0=1(.70)$	1	0.58	-0.08	0.37	-0.45
1=2	0.58	1	-0.60	0.43	-0.74
$0=5+2=3(.76)$	-0.08	-0.60	1	-0.07	0.60
$2=4+3=4(.83)+0=4(.69)$	0.37	0.43	-0.07	1	-0.41
$3=5+4=5(.76)$	-0.45	-0.74	0.60	-0.41	1

В представленной выше таблице остался только один значимый  $|KK|>0.62$ , который имеет отрицательное значение (окрашен зеленым фоном) и характеризует обратную зависимость в вариациях длин БЛ. Обращают на себя внимание 2 КК близкие к пограничным значениям уровня достоверности:  $1=2\_I$  (0.58) и  $II\_IV$  (0.60). Теоретически эти связи не противоречат сложившейся структуре кластеров и их деформационно-кинематическим характеристикам. Т.е. можно было бы продолжить объединение (свертывание) и на этих уровнях корреляции. Для визуализации проделанных вычислений отразим данные корреляционные кластеры БЛ в плане (рис. 4.1-5).

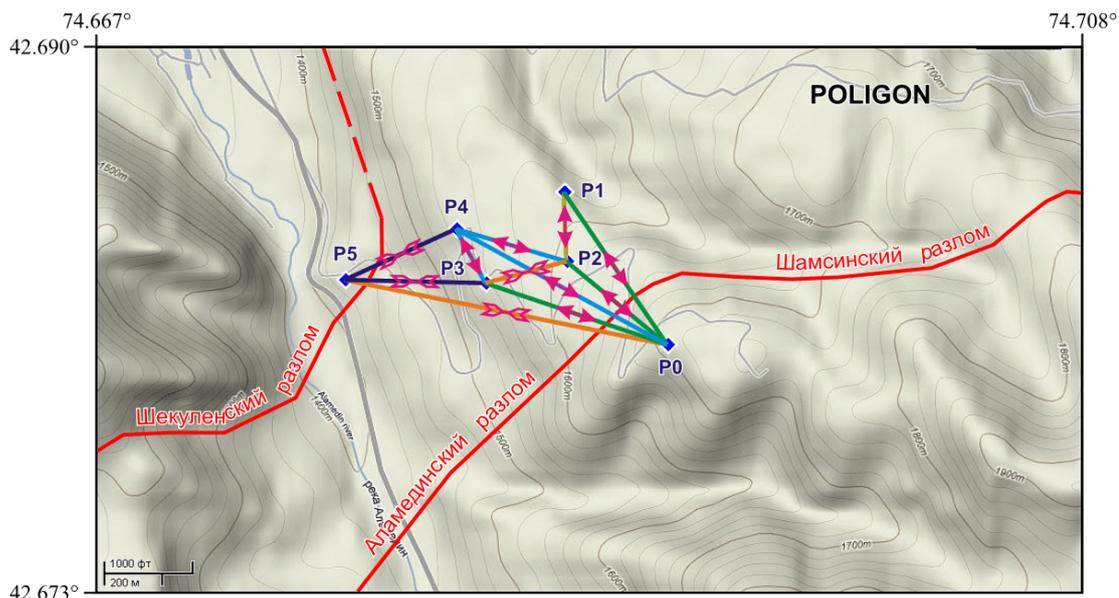


Рисунок 4.1-5 – Разными цветами отражены 4 кластера базовых линий, сгруппированных при минимальном коэффициенте корреляции >0.69 для временных рядов изменения длин БЛ площадки POLIGON за 2012-2016 гг. Малиновые стрелки – тенденции удлинения и укорочения для базовых линий.

Таким образом, на уровне  $KK > 0.69$  для временных рядов вариаций длин БЛ выделено 4 кластера. Наибольшая скорость деформации (в среднем  $-2.54 \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>) соответствует кластеру IV, где объединены синие БЛ 3=5 и 4=5 при  $KK=0.76$ . Этот кластер характеризует поперечное укорочение в районе шва Шекуленского взброса. Сопряженный с IV кластер II включает оранжевые БЛ 0=5 и 2=3 ( $KK=0.76$ ), которые также испытывают деформацию укорочения со средней скоростью  $-2.31 \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>. Как уже отмечалось, кластеры II и IV могут быть объединены на уровне  $KK=0.60$ . Следующий кластер III объединяет голубые БЛ 2=4, 3=4 и 0=4 на минимальном уровне  $KK=0.69$ , здесь средняя деформация удлинения равна  $0.99 \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>. У кластера III все БЛ сопряжены с репером 4, движения которого, видимо и влияют на характер деформации всех БЛ кластера. наконец, кластер I включает зеленые БЛ 0=2, 0=3 и 0=1 с минимальным уровнем  $KK=0.70$ , для него также характерна деформация удлинения со средней скоростью  $0.94 \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>. Все БЛ этого кластера также имеют один общий репер 0, движение которого может быть определяющим для всего кластера. БЛ 1=2 может быть объединена с кластером I на уровне  $KK=0.58$ .

Представленные выше данные анализа не противоречат построениям прошлого года, и только их уточняют и дополняют. Интересным здесь может быть явная анизотропия вариаций длин БЛ кластера IV (со средним простиранием  $78^\circ$ ) и БЛ 1=2 (простирание  $178^\circ$ ). В первом случае проявлены максимальные скорости деформации укорочения, а во втором случае – максимальная скорость деформации удлинения. Эти направления могут характеризовать главные оси деформации для площадки POLIGON.

### ***Площадка KENTOR.***

Для 10 БЛ геодезической площадки зафиксировано 187 циклов измерений с 06.06.2012 по 12.10.2016. Также как и на площадке POLIGON, здесь не зафиксировано существенных всплесков длин базовых линий за последний год наблюдений. В качестве примера приведем график вариаций самой длинной БЛ площадки К3=5 (рис. 4.1-6).



Рисунок 4.1-6 – Характер вариаций длин БЛ К3=5 на площадке KENTOR, с 06.06.2012 по 12.10.2016 проведено 187 циклов измерений.

Поскольку экстремальные всплески длин БЛ были охарактеризованы в прошлогоднем отчете, поэтому рассмотрим более детально фоновые вариации длин БЛ. Для увеличения детальности вертикальной шкалы, удалим из рядов дни измерений, на которые приходится всплески более чем на 5 мм длины относительно ближайших дней. В результате такой процедуры более четко обозначились деформационные тенденции и сезонные вариации длин БЛ. Например, у самой короткой линии площадки КЗ=4 довольно отчетливо проявились всплески сезонных вариаций (рис. 4.1-7).



Рисунок 4.1-7 – Проявление экстремумов сезонных вариаций длины БЛ КЗ=4 на площадке KENTOR.

При сглаживании тренда на рис. 4.1-7, с небольшими отклонениями, максимумы вариаций длинны БЛ приходятся на июнь месяц, соответственно минимальные значения выпадают на январь. Размах сезонных вариаций составляет 6-8 мм.

Максимальные значения остаточных деформаций укорочения проявлены у БЛ К1=6, при длине линии 2281 м скорость уменьшения длины составляет 0.94 мм/год (рис. 4.1-8).



Рисунок 4.1-8 – Характер вариаций длин и наклона прямолинейного тренда БЛ К1=6 на площадке KENTOR.

В последнем случае четкого проявления сезонных вариаций не наблюдается. Возможно, это из-за сравнительно большой длины БЛ – 2.28 км. Также здесь проявлен более интенсивно пилообразный характер приращения длин относительно соседних измерений. Размах вариаций относительно прямолинейного тренда у БЛ К1=6 достигает уже 12-14 мм.

Основные характеристики ежегодного удлинения-укорочения для БЛ площадки KENTOR представлены в таблице 4.1.4.

Таблица 4.1.4 – Скорости изменения длины и деформации для БЛ площадки KENTOR.

Параметры	Базовые линии									
	К1=5	К1=6	К2=3	К2=5	К2=6	К3=4	К3=5	К3=6	К4=6	К5=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 <sup>-1</sup>	-0.729	-0.412	-0.356	0.397	-0.844	1.077	-0.220	0.079	0.586	-0.477

Таким образом, скорость изменения длин БЛ площадки KENTOR варьирует по модулю от 0.08 до 1.00 мм/год. Скорость деформации удлинения изменяется от 0.079 до 1.077 (в среднем  $0.535) \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>. Удлинению подвержены только 4 БЛ с простирациями 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  $-0.220 \div -0.844$  (в среднем  $-0.506) \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>. На площадке POLIGON в среднем в 1.8 раза более интенсивно проявлены скорости деформации укорочения (максимальное значение  $-3.45 \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup> по аз. 75°), чем деформации удлинения (максимальное значение  $3.63 \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup> по аз. 178°). Здесь же в среднем деформации укорочения и удлинения примерно равны. Максимальная скорость деформации удлинения  $1.077 \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup> проявлена по аз. 152°, а максимальная скорость деформации укорочения  $-0.844 \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup> зафиксирована по аз. 21°.

По аналогии с описанием площадки POLIGON рассчитаем коэффициенты корреляции для 10 временных рядов БЛ площадки KENTOR, и представим здесь уже свернутую таблицу КК для кластеров БЛ.

Таблица 4.1.5 – Коэффициенты корреляции между кластерами БЛ площадки POLIGON.

БЛ	1=6+2=6(.79)+5=6(.76)+1=5(.62)	2=5	2=3+3=5(.74)	3=4+4=6(.80)	3=6
Кластеры БЛ	I		II	III	
1=6+2=6(.79)+5=6(.76)+1=5(.62)	1	-0.12	0.42	-0.25	-0.06
2=5	-0.12	1	0.29	0.51	0.51
2=3+3=5(.74)	0.42	0.29	1	0.04	0.57
3=4+4=6(.80)	-0.25	0.51	0.04	1	0.37
3=6	-0.06	0.51	0.57	0.37	1

Представленная выше таблица свернута до кластеров БЛ с  $KK > 0.62$ , поэтому здесь не осталось  $KK$  большее этой величины. Также здесь не проявлены отрицательные  $|KK| > 0.62$ . Здесь обращает на себя внимание I кластер, включающий в себя 4 БЛ при минимальном  $KK = 0.62$ . Два других кластера содержат по 2 БЛ. Кластер II включает 2 БЛ  $K2=3$  и  $K3=5$ , объединённые при  $KK = 0.74$ . Кластер III также объединяет 2 БЛ  $K3=4$  и  $K4=6$  при  $KK = 0.80$ . Две оставшиеся БЛ не вошли вообще в какие-либо кластеры. Для визуализации полученных выше корреляционных кластеров БЛ отразим их в плане (рис. 4.1-9). При этом полученная картина объединения БЛ несколько отличается от кластерной структуры, построенной в прошлом году, т.к. ранее она состояла только из 2-х кластеров по 3 БЛ в каждом.

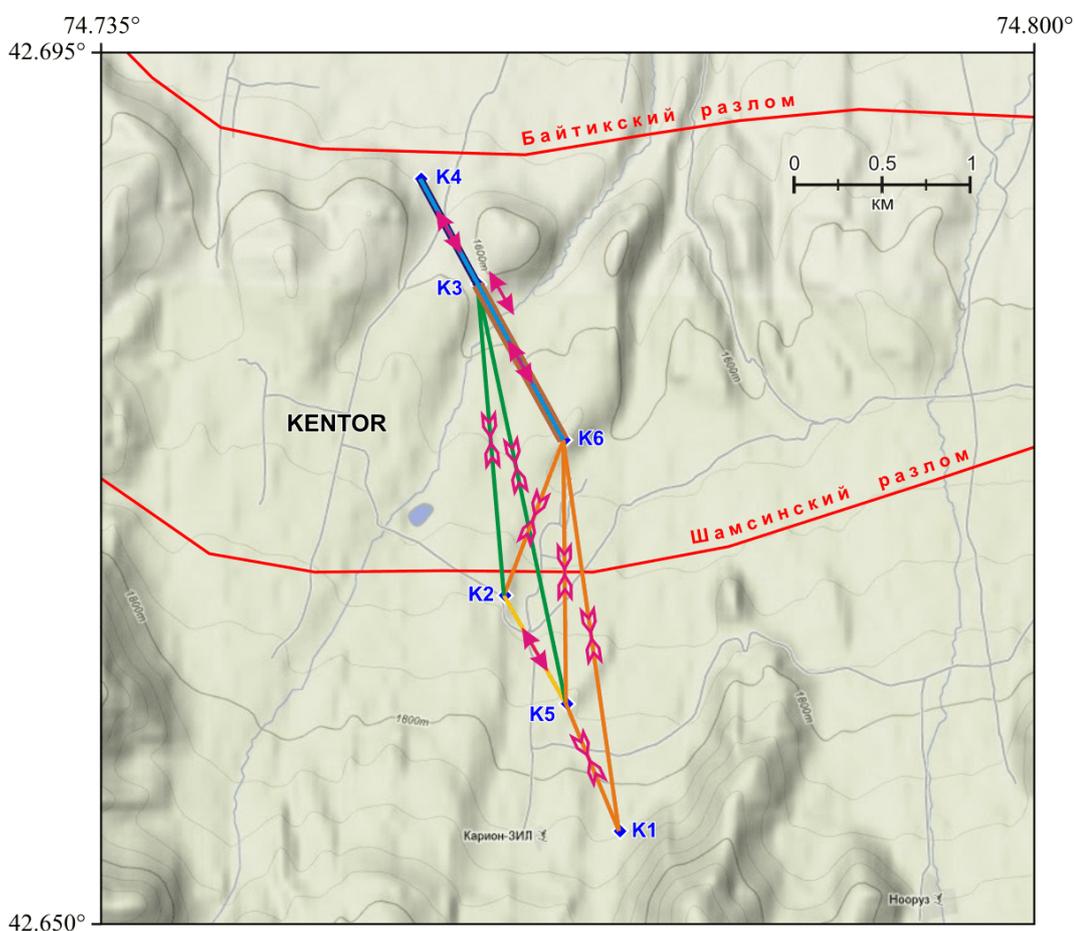


Рисунок 4.1-9 – Разными цветами отражены 3 кластера базовых линий с коэффициентами корреляций  $\geq 0.62$  для временных рядов изменения длин БЛ площадки KENTOR за 2012-2016 гг. Малиновые стрелки – тенденции удлинения и укорочения для базовых линий.

Самый крупный кластер I включает в себя все измеряемые БЛ между пунктами 1, 2, 5 и 6; кроме БЛ  $K2=5$ , которая имеет  $KK = -0.12$  по отношению к кластеру I. Режим вариаций длин БЛ кластера I характеризуется деформацией укорочения и связан с движениями по шву Шамсинского разлома. Диссонансные вариации длины БЛ  $K2=5$  могут быть связаны с несколько отличными

приразломными деформациями, т.к. репер К2 расположен достаточно близко к срединной линии разлома и БЛ К2=5 подвергается деформации удлинения.

Скорее всего, в кластере II ключевую роль играет репер К3, поскольку на него сходятся обе линии кластера, и он удален в 2 раза дальше от шва Шамсинского разлома, чем репер К6. Тем не менее кластеры I и II испытывают деформацию укорочения, хоть и в несколько отличных режимах вариаций ( $KK=0.42$ ). Все линии, пересекающие субмеридионально шов разрыва, однозначно свидетельствуют о взбросовом характере движений по Шамсинскому разлому со средней скоростью  $-0.73$  мм/год или средней скоростью деформации  $-0.462 \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>.

Для III кластера определяющим является режим движений репера К4, т.к. обе БЛ связаны с этим репером. Не исключено, что этот режим движений для К4 определяется непосредственной близостью к шву Байтикского разлома и его влиянием. БЛ К3=4, К4=6 и К3=6 лежат практически в одном створе, но К3=6 имеет с кластером III  $KK=0.37$ . В тоже время кластер III и К3=6 имеют корреляционную связь по 0.51 с БЛ К2=5. Средняя скорость удлинения между реперами К4 и К6, с учетом 3 БЛ, составляет 0.61 мм/год, а средняя скорость деформации равна  $0.581 \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>.

#### ***Площадка ALMALY.***

На площадке измерению подлежат всего 23 БЛ (рис. 4.1-10). На площадке самой короткой измеряемой линией является А2-3 ~ 149 м, а самая длинная – А13-14 ~ 1750 м. Измерения БЛ с участием тумбы А14 начаты с апреля 2013 г.

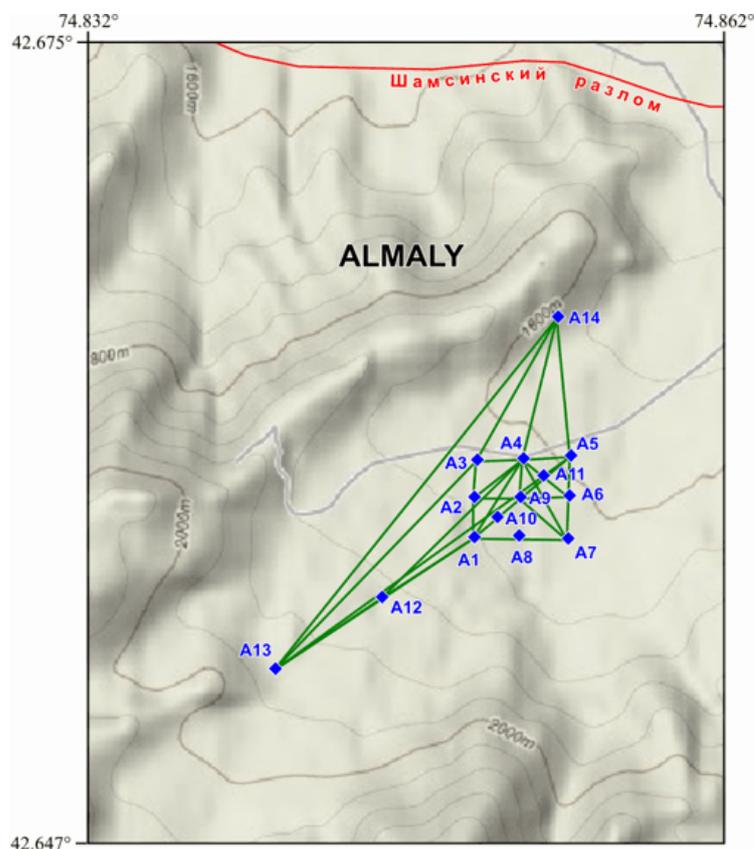


Рисунок 4.1-10 – Геодезические реперы (14) и базовые линии (23) линейно-угловых измерений на площадке ALMALY. Красная линия – активный разлом.

Необходимо отметить, что пункты А13 и А14, а также связанные с ними БЛ, рассматриваются здесь отдельно от основного центрального квадрата площадки. Это связано с более поздней установкой пункта А14, с более сложными подходами к ним в зимнее время (пропуски измерений), некоторое удаление к югу и к северу от центра площадки. Таким образом, с 07.06.2012 по 28.10.2016 получено 184 цикла измерений для 15 БЛ центральной части площадки. И с 28.03.2013 по 28.10.2016 зафиксировано 152 цикла измерений для 8 БЛ, связанных с пунктами А13 и А14.

Из опыта линейно-угловых наблюдений прошлых лет для центральной части площадки ALMALY наиболее полно и контрастно деформации проявляются в северо-западной части квадрата (рис. 4.1-10), на БЛ, опирающихся на репера А2, А3 и А4. В этой связи на рис. 4.1-11 представлен временной ряд из 184 измерений для БЛ А2=3 с 07.06.2012 по 28.10.2016.

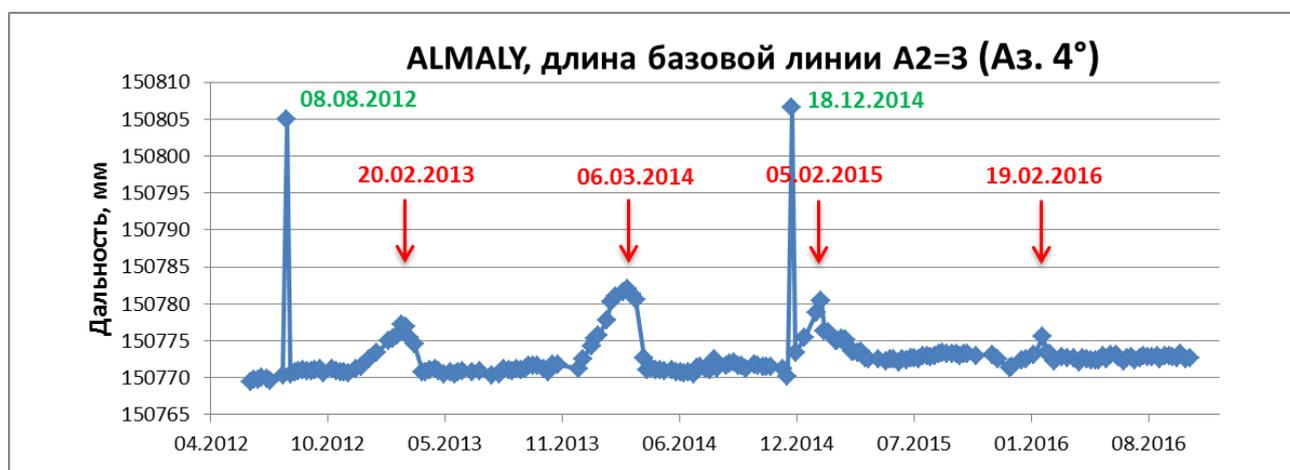


Рисунок 4.1-11 – Всплески в изменении длины БЛ А2=3, наиболее полное отражение деформаций для центральной части площадки ALMALY с 07.06.2012 по 28.10.2016 (184).

Основные экстремальные всплески длины БЛ А2=3 по октябрь 2015г уже были охарактеризованы в прошлогоднем отчете. Для текущего года интерес может представлять незначительная аномалия с декабря 2015г по март 2016г увеличения длинны БЛ до 5-6 мм и затем возвращение на предыдущий уровень. Таким образом, в текущем году аномалия проявлена не столь отчетливо, но тем ни менее продолжается череда ежегодных всплесков длины БЛ А2=3, пики которых выпадают преимущественно на февраль месяц (рис. 4.1-11). Остальные БЛ площадки ALMALY не имеют каких-либо важных проявлений в вариациях длин в текущем году (рис. 4.1-12).



Рисунок 4.1-12 – Пример типичных вариаций длин для БЛ центральной части площадки ALMALY с 07.06.2012 по 28.10.2016 (184).

Для периферийных БЛ площадки, опирающихся на реперы А13 и А14, за малым исключением временные вариации длин имеют сравнительно однообразный рисунок. Это можно показать на примере самой протяженной БЛ площадки (рис. 4.1-13).

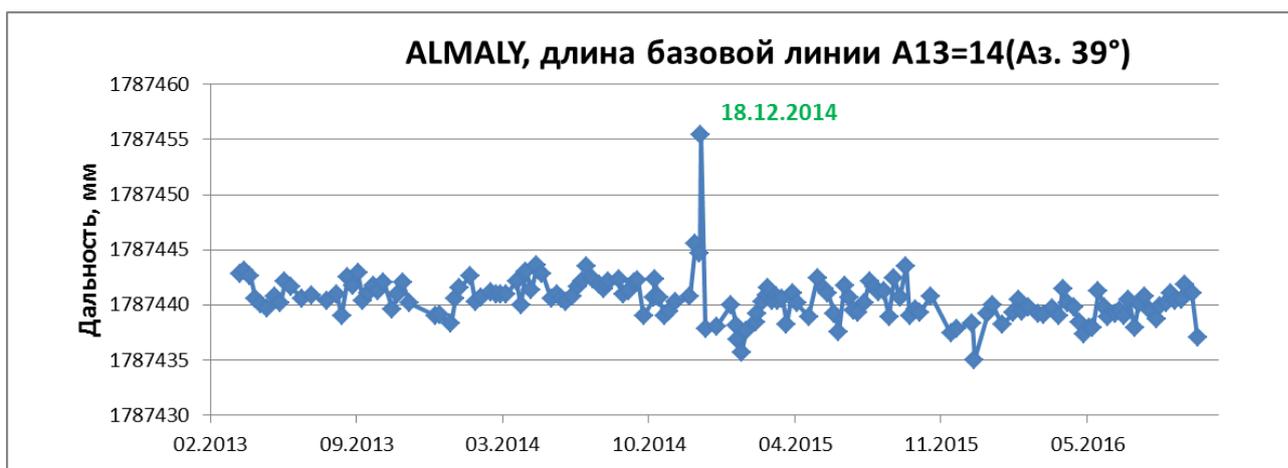


Рисунок 4.1-13 – Пример типичных вариаций длин для БЛ периферии площадки ALMALY с 28.03.2013 по 28.10.2016 (158).

Представим сравнение вариаций БЛ А3=13 и А3=14, где отчетливо выделяется 3 интенсивных, но разных по характеру деформаций для площадки ALMALY (рис. 4.1-14).

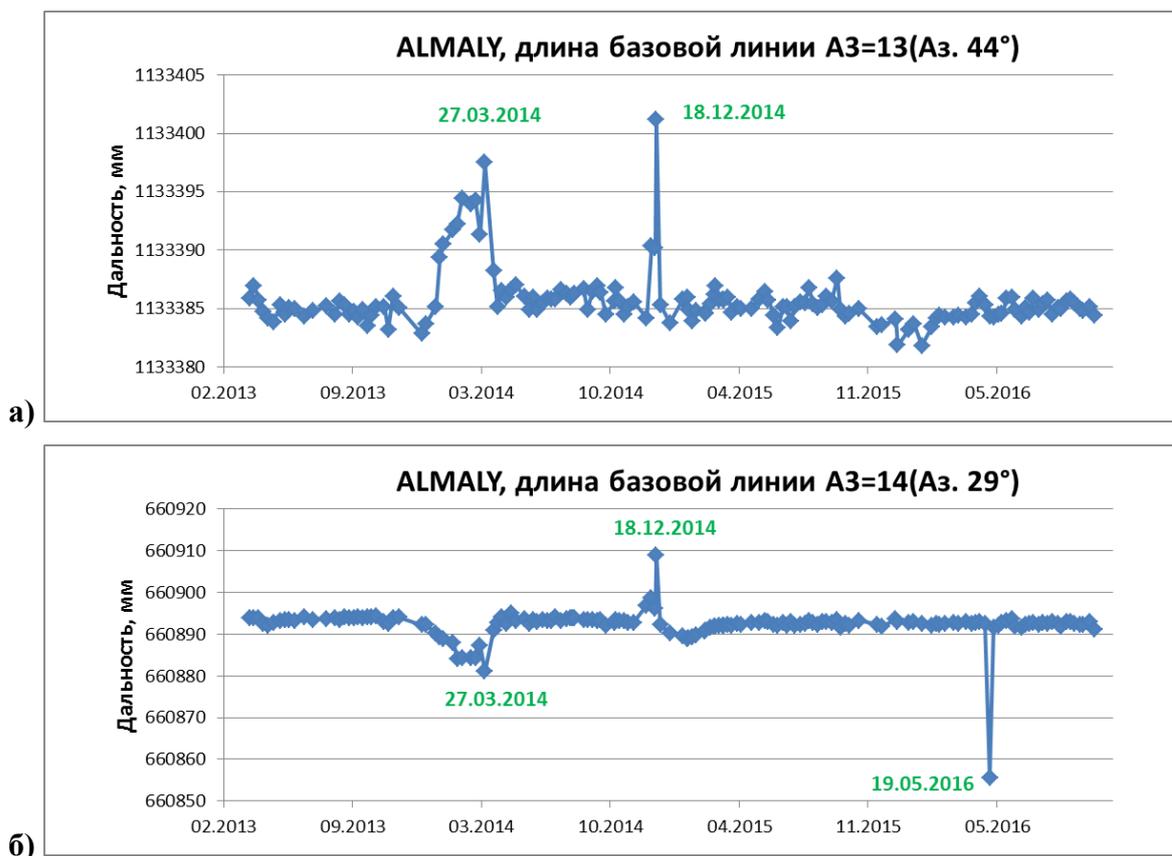


Рисунок 4.1-14 – Интенсивные и различные по характеру деформационные аномалии на площадке ALMALY с 28.03.2013 по 28.10.2016 (158). а) БЛ АЗ=13, б) БЛ АЗ=14

Первая по хронологии аномалия имеет начало в январе и заканчивается в апреле 2014г (~3 месяца) с экстремумами 27.03.2014. Причем БЛ АЗ=13 (южная часть площадки) испытывает удлинение до 12-13 мм, а БЛ АЗ=14 (северная часть площадки) претерпевает синхронное укорочение до 11-12 мм. Если учесть, что в вариациях длин БЛ А13=14 эта аномалия отсутствует (рис. 4.1-13), то можно сделать заключение о локальном характере аномалии, и о связи ее с движением репера АЗ. На БЛ А2=3 и АЗ=4 эта аномалия тоже просматривается отчетливо, а вот по мере пространственного удаления от репера АЗ на БЛ отпечатываются еле заметные ее следы или не фиксируются вообще.

Вторая аномалия выпадает на 03÷25 декабря 2014г с максимальным значением 18.12.2014. Особенность этой аномалии – проявление удлинения всех БЛ. При этом, для периферийных БЛ и для большинства БЛ центральной части площадки максимальное превышение над фоном до 15-16 мм. Однако короткие БЛ в центральной части, которые опираются на реперы А2, АЗ, А4 и А9 имеют максимальное превышение над фоновыми значениями до 30-40 мм.

Последняя аномалия проявилась значительным уменьшением (на 35-40 мм) длин только 2-х БЛ площадки АЗ=14 и А1=13, что скорее всего, свидетельствует об ошибках в измерениях.

Для БЛ площадки ALMAY удалим дни измерений, на которые приходится всплески более чем на 5 мм длины относительно ближайших дней. Например, показанная на рис. 4.1-11 БЛ A2=3 примет вид как на рис. 4.1-15а.

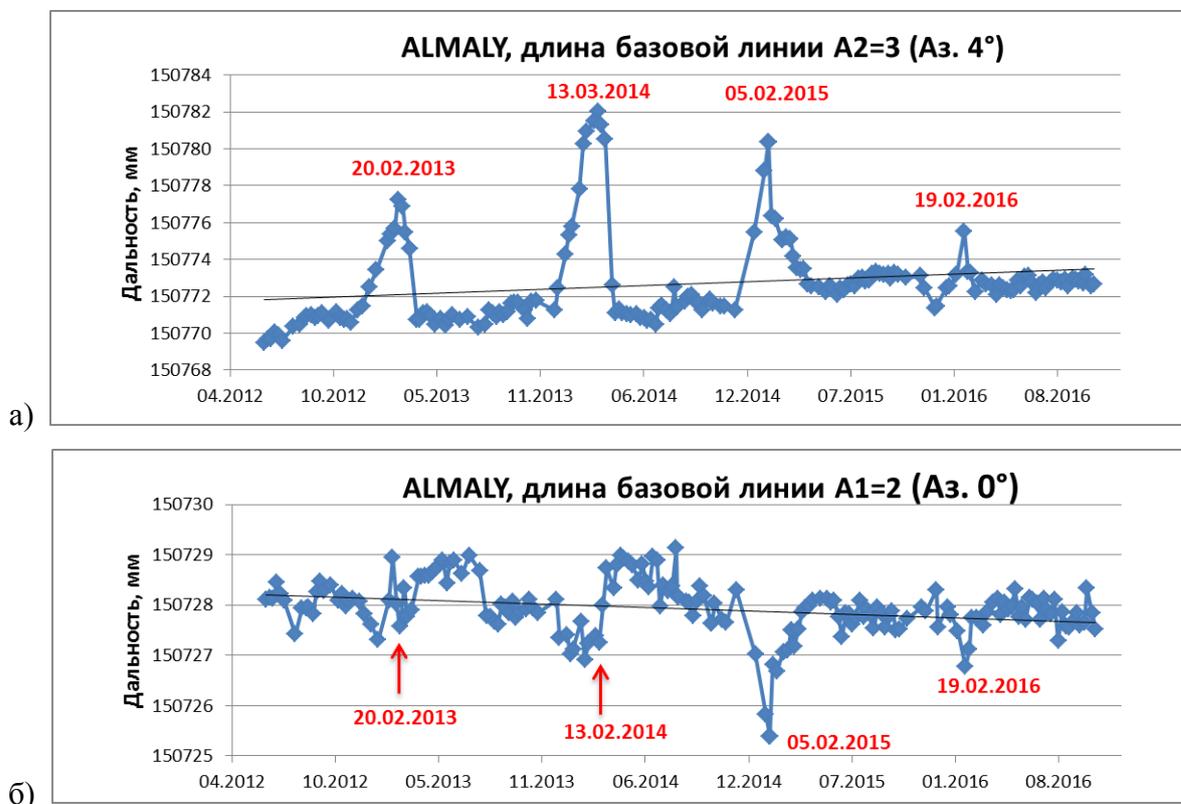


Рисунок 4.1-15 – Проявление одних и тех же деформаций для ближайших БЛ меридионального направления: а) A2=3, б) A1=2.

Из рядов рис. 4.1-15 следует, что репер A2 во время деформационных аномалий сдвигается к югу (в сторону репера A1). Но в идеале такой зависимости нет, т.к. максимумы укорочений БЛ A1=2 строго не соответствуют максимумам удлинения БЛ A2=3 (2013 и 2014 гг.). Учитывая данные рисунков 4.1-13,14,15 можно говорить о сложном сочетании движений реперов A2 и A3, а возможно – и репера A1. Минимально закономерно подвержена изменениям длины диагональная (CB) и наиболее длинная БЛ центральной части площадки ALMAY (рис. 4.1-16).

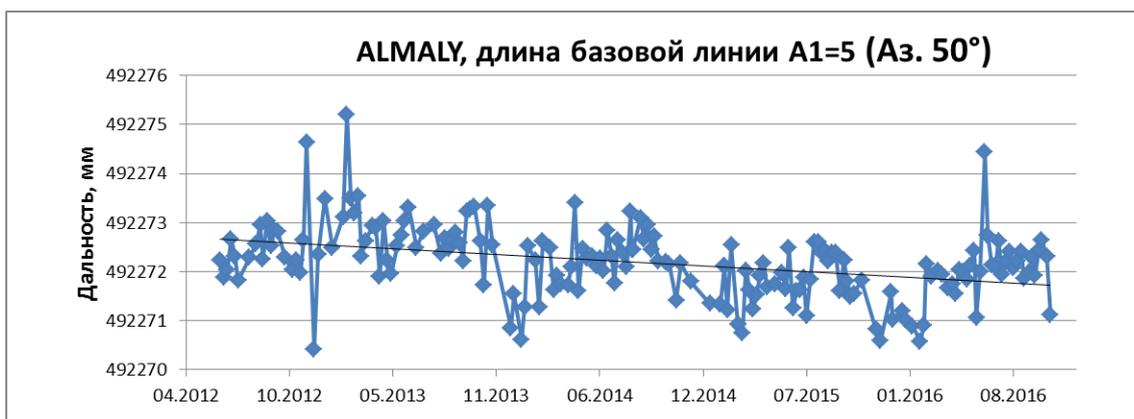


Рисунок 4.1-16 – Вариации длины БЛ А1=5, диагонально пересекающую центральную часть площадки ALMALY.

Из периферийных БЛ интерес представляют ряды А3=13 и А3=14 (рис. 4.1-17).

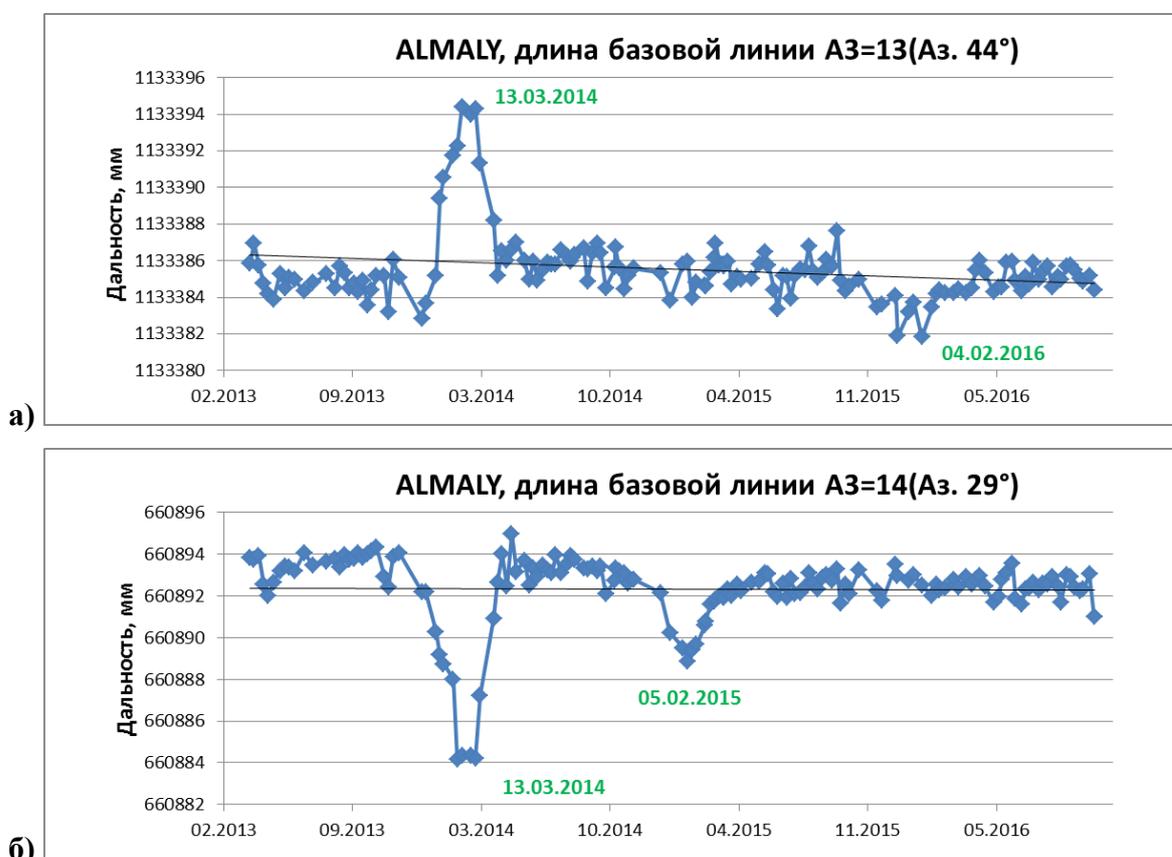


Рисунок 4.1-17 – Фоновые вариаций длин БЛ площадки ALMALY: а) А3=13, б) А3=14.

Без экстремальных выбросов складывается следующая ситуация при сравнении северной (БЛ А3=14) и южной (БЛ А3=13) частей площадки ALMALY. Первая аномалия 2014г имеет максимальную интенсивность и фиксируется зеркально по направленности, как с северной стороны, так и на восточной половине исследуемой площадки. Вторая – менее значительная аномалия укорочения 2015г отразилась только в вариациях северной части площадки (БЛ А3=14). И наконец, третья – минимально выразительная аномалия укорочения 2016г заметна только в южной половине площадки (БЛ А3=13).

Для понимания общих тенденций относительного движения реперов в таблице 4.1.6 сведены основные характеристики ежегодного удлинения-укорочения для БЛ площадки ALMALY.

Таблица 4.1.6 – Скорости изменения длины и деформации для БЛ площадки ALMALY.

Базовые линии	Параметры			
	Длина (L), м	Азимут, °	Скорость изменения L, мм/год	Скорость деформации, $\times 10^{-6}$ год <sup>-1</sup>
A1=2	150	0	-0.13	-0.867
A1=4	366	32	0.09	0.246
A1=5	492	50	-0.23	-0.467
A1=7	359	91	-0.06	-0.167
A1=13	928	56	0.00	0.000
A2=3	150	4	-0.23	-1.533
A2=4	246	52	0.13	0.528
A2=9	181	90	0.21	1.160
A3=4	180	88	0.59	3.278
A3=13	1133	44	-0.05	-0.044
A3=14	660	29	-0.00	-0.000
A4=5	179	87	-0.18	-1.006
A4=6	228	129	0.20	0.877
A4=7	350	151	-0.23	-0.657
A4=9	151	4	0.44	2.914
A4=13	1271	50	-0.01	-0.008
A4=14	571	14	-0.23	-0.403
A5=7	318	2	-0.29	-0.912
A5=13	1418	54	-0.28	-0.197
A5=14	530	175	-0.17	-0.321
A6=9	179	88	-0.28	-1.564
A7=9	234	131	-0.54	-2.308
A13=14	1787	39	-0.25	-0.140

Скорость изменения длин БЛ площадки ALMALY варьирует по модулю от 0.00 до 0.59 мм/год, что примерно в 2 раза меньше максимальной скорости на площадках POLIGON и KENTOR. Прямолинейная аппроксимация графиков изменения длин БЛ A1=13 и A3=14 дает почти горизонтальные линии и нулевые скорости тенденции удлинения-укорочения. Для 6 БЛ определена скорость удлинения от 0.09 до 0.59 (в среднем 0.28) мм/год, при этом скорость деформации удлинения варьирует от 0.246 до 3.278 (в среднем 1.500)  $\times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>. Соответственно для 15 БЛ определена скорость укорочения от -0.01 до -0.54 (в среднем -0.21) мм/год, при этом скорость деформации укорочения изменяется от -0.008 до -2.308 (в среднем -0.706)  $\times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>. Какой-либо закономерности удлинения-укорочения от направления БЛ здесь не наблюдается.

Рассчитаем коэффициенты корреляции для 23 временных рядов БЛ площадки ALMALY без экстремальных выбросов. Проведем процедуру объединения столбцов и строк этой корреляционной таблицы до кластеров БЛ с  $KK \geq 0.62$  и представим свернутую таблицу  $KK$  для кластеров БЛ площадки (табл. 4.1.7).

Таблица 4.1.7 – Коэффициенты корреляции между кластерами БЛ площадки ALMALY.

Кластеры БЛ	1=2	1=4	1=7	1=13	2=4	2=9	3=4	Iк	3=14	IIк	4=6	4=9	IIIк	IVк	Vк	VIк
1=2		0.1	0.1	0.2	-0.5	-0.4	-0.2	-0.3	0.4	0.3	-0.5	-0.3	-0.2	0.4	0.0	0.4
1=4	0.1		0.2	-0.6	-0.4	-0.2	-0.1	0.0	0.2	-0.2	-0.3	0.3	0.0	-0.1	0.2	0.2
1=7	0.1	0.2		0.1	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.3	0.3	0.1	0.4	0.2	0.3	0.1
1=13	0.2	-0.6	0.1		0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.2	0.2	0.0	0.0	0.4	-0.1	0.5
2=4	-0.5	-0.4	0.2	0.0		0.6	0.2	0.2	-0.2	-0.1	0.4	0.4	0.4	-0.2	0.1	-0.2
2=9	-0.4	-0.2	0.1	0.1	0.6		0.2	0.3	-0.1	-0.2	0.5	0.4	0.4	-0.2	-0.2	-0.1
3=4	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.2	0.2		-0.5	0.6	-0.2	0.3	0.5	-0.4	-0.2	-0.3	-0.2
2=3+3=13(66), Iк	-0.3	0.0	0.1	0.0	0.2	0.3	-0.5		-0.8	-0.2	0.2	0.1	0.4	-0.1	0.0	0.1
3=14	0.4	0.2	0.0	0.3	-0.2	-0.1	0.6	-0.8		0.4	-0.1	0.0	-0.4	0.4	-0.1	0.3
1=5+4=5(71), IIк	0.3	-0.2	0.3	0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.4		0.0	-0.4	0.3	0.4	0.5	0.3
4=6	-0.5	-0.3	0.3	0.2	0.4	0.5	0.3	0.2	-0.1	0.0		0.5	0.3	-0.2	0.0	-0.1
4=9	-0.3	0.3	0.1	0.0	0.4	0.4	0.5	0.1	0.0	-0.4	0.5		-0.1	-0.5	-0.5	-0.2
4=7+5=7(76), IIIк	-0.2	0.0	0.4	0.0	0.4	0.4	-0.4	0.4	-0.4	0.3	0.3	-0.1		0.1	0.5	0.0
4=14+5=14(67), IVк	0.4	-0.1	0.2	0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0.4	0.4	-0.2	-0.5	0.1		0.3	0.5
6=9+7=9(67)Vк	0.0	0.2	0.3	-0.1	0.1	-0.2	-0.3	0.0	-0.1	0.5	0.0	-0.5	0.5	0.3		0.0
4=13+5=13(82)+13=14(67), VIк	0.4	0.2	0.1	0.5	-0.2	-0.1	-0.2	0.1	0.3	0.3	-0.1	-0.2	0.0	0.5	0.0	

Здесь образовано 6 кластеров на минимальном уровне  $KK=0.66$ . Самый крупный из них (VIк) состоит из 3 самых длинных БЛ ( $A_4=13$ ,  $A_5=13$  и  $A_{13}=14$ ) северо-восточного простирания и все эти БЛ опираются на репер  $A_{13}$ . Остальные 5 кластеров включают по 2 БЛ, которые опираются на один общий репер:  $A_{14}$ ,  $A_9$ ,  $A_7$ ,  $A_5$  и  $A_3$ . Остальные БЛ не вошли в какие-либо кластеры при заданном уровне  $KK \geq 0.62$ . Кроме этого, отмечается высокий  $KK=-0.80$  обратной зависимости в вариациях длин между I кластером ( $A_2=3$  и  $A_3=13$ ) и БЛ  $A_3=14$ . Еще одна обратная зависимость  $KK=-0.60$  связывает БЛ  $A_1=4$  и  $A_1=13$ .

Представим в плане вышеописанные кластеры и основные направления деформаций (рис. 4.1-18). Все кластеры БЛ имеют деформацию укорочения. И только для части БЛ, связанных с реперами  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  характерно удлинение. Формируется довольно не простая конфигурация движений даже внутри квадрата центральной части площадки ALMALY. При такой ситуации меридиональная линия реперов  $A_3$  и  $A_2$  отодвигается к западу, а репер  $A_4$  отодвигается к северу. Остальные реперы испытывают центробежные тенденции на территории площадки ALMALY.

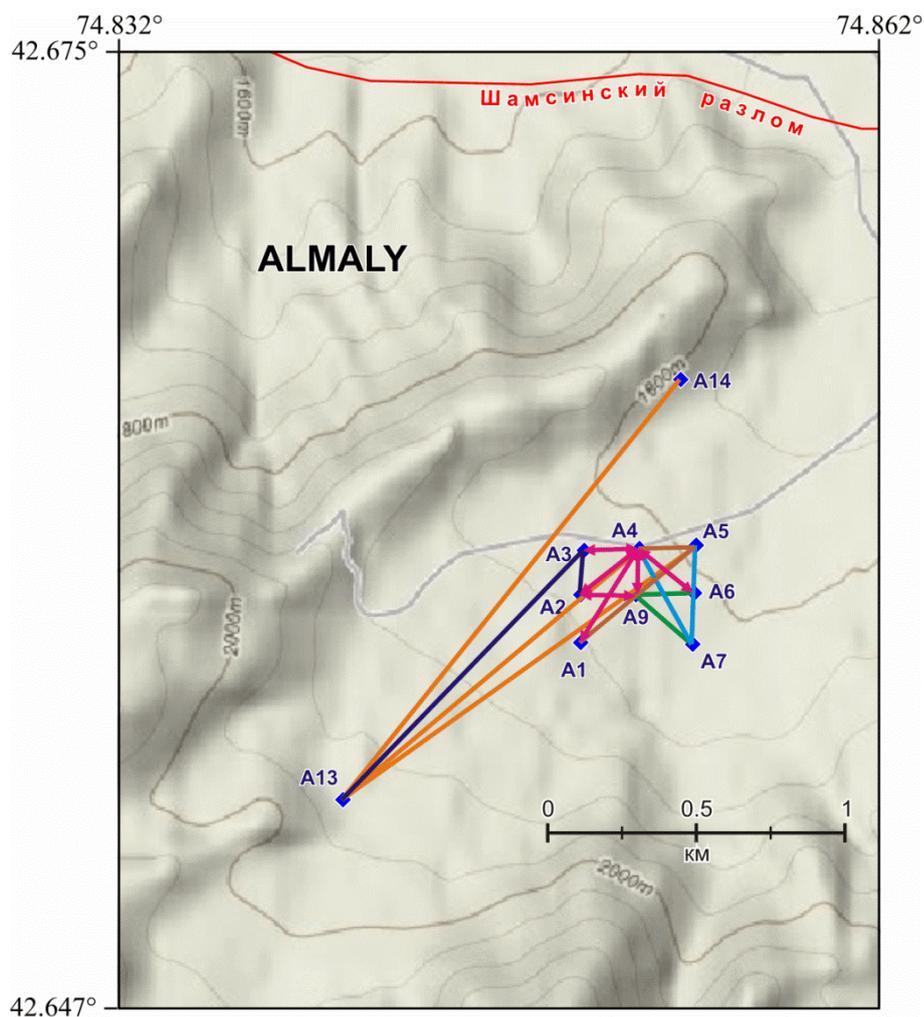


Рисунок 4.1-18 – Кластеры БЛ (одним цветом, без стрелок, укорочение) с высокими коэффициентами корреляции между временными рядами длин за 2012-2016 гг. Малиновые линии со стрелками – не связанные друг с другом БЛ (деформация удлинения).

## 4.2 Нивелирование геодезических площадок

Текущий 2016 год выдался излишне дождливым, поэтому нам не удалось провести запланированные циклы нивелирования на всех 3-х геодезических площадках в полном объеме. На площадке POLIGON удалось отмерить только один раз 2 секции. Площадка KENTOR в этом году не измерялась вообще. И лишь площадка ALMALY измерена дважды в полном объеме.

### *Площадка POLIGON.*

В 2012г был заложен нивелирный профиль P0-P2-P3-P4 от самого высокого P0 ~1736 м до репера P4 ~1561 м. В 2015 г проложен новый сегмент профиля от P4 до самого низкого репера P5 ~1513 м (рис. 4.2-1). С момента заложения площадки и по ноябрь 2015 г проведено 7 циклов измерений. В сентябре 2016 г измерены один раз только 2 секции между фундаментальными реперами площадки POLIGON.

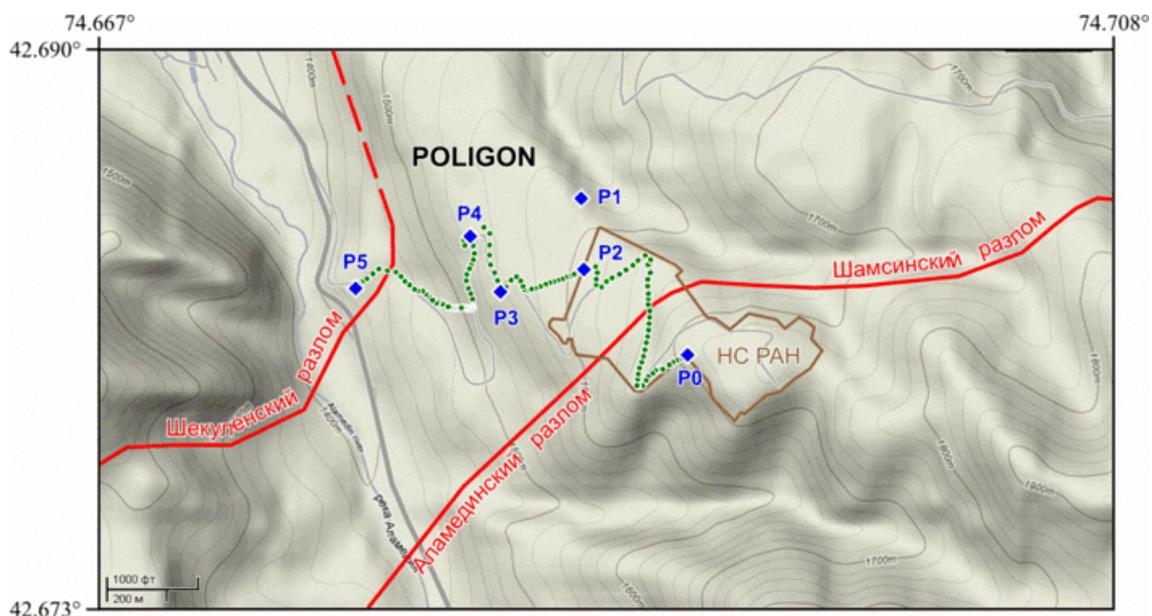


Рисунок 4.2-1 – Секции нивелирования на площадке POLIGON, проходящая по реперам P0, P2, P3, P4 и по промежуточным пунктам (костылям – зеленые точки)

Результаты нивелирования по площадке POLIGON приведены в таблице 4.2.1.

Таблица 4.2.1 – Результаты измерений по секциям нивелирного хода для площадки POLIGON.

Год- месяц	Секция; L – длина хода; H – превышение реперов; Δh – расхождение 2-х измерений.											
	hP0=2			hP2=3			hP3=4			hP4=5		
	L, м	H, мм	Δh, мм	L, м	H, мм	Δh, мм	L, м	H, мм	Δh, мм	L, м	H, мм	Δh, мм
2012-10	1055	-116881.74	0.63	330	-45624.39	0.12	329	-11982.03	0.42			
2013-04	1050	-116879.97	1.54	335	-45623.66	0.72	325	-11980.93	0.25			
2013-11	1052	-116882.85	0.60	340	-45624.85	0.32	320	-11982.05	0.47			
2014-04	1055	-116879.02	0.15	347	-45623.43	0.28	319	-11980.54	0.24			
2014-10	1050	-116881.39	0.36	395	-45623.37	0.61	308	-11979.05	0.09			
2015-04	1030	-116883.69	0.87	400	-45623.78	1,21	320	-11980.91	0.33	1450	-131875.74	4.08
2015-09	1030	-116886.18	1.42	400	-45623.81	0.83	320	-11982.77	0.80	1455	-131880.43	1.64
2015-09	1050	-116886.91	0.32				369	-11981.11	0.39			

Превышения между всеми наблюдаемыми фундаментальными реперами не имеют каких-либо тенденций с течением времени. Как правило, для одной секции отличие разновременных превышений не более первых миллиметров с переменным знаком. Скорее всего, эти вариации отражают ошибки нивелирования.

### **Площадка KENTOR.**

В 2012г произведена закладка нивелирных сегментов для площадки KENTOR от основного пункта K2 (~1720м) до самого низкого (~1592м) репера K3 (рис. 4.2-2). На ноябрь 2015 г проведено всего 7 циклов измерений. В 2016г из-за погодных условий на площадке KENTOR не удалось провести нивелирование вообще.

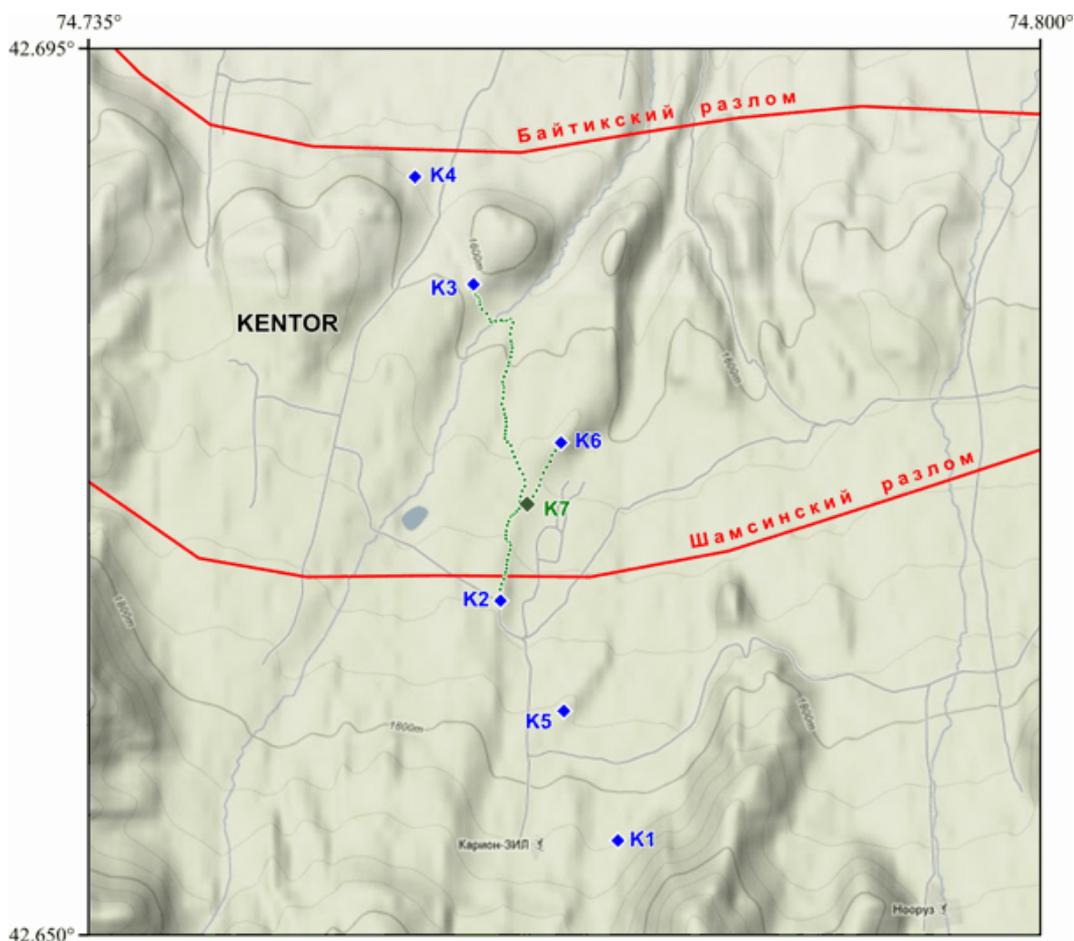


Рисунок 4.2-2 – Нивелирный профиль на площадке KENTOR, состоящий из 3-х сегментов: K2-7, K3-7 и K6-7. K7 – промежуточный фундаментальный нивелировочный пункт. Зеленые точки – промежуточные пункты с закладкой костылей. Красные линии – активные разломы.

Результаты нивелирования по площадке KENTOR сведены в таблице 4.2.2.

Таблица 4.2.2 – Результаты измерений по секциям нивелирного хода для площадки KENTOR.

Год- месяц	Секция; L – длина хода; Н – превышение реперов; Δh – расхождение 2-х измерений.								
	hK2=7			hP3=7			hP6=7		
	L, м	H, мм	Δh, мм	L, м	H, мм	Δh, мм	L, м	H, мм	Δh, мм
2012-09	840	-71679.62	3.38	1300	53180.16	0.90	350	-3045.48	0.38
2013-05	835	-71679.67	3.09	1310	53176.96	1.48	345	-3048.69	0.27
2013-08	830	-71679.66	1.34	1315	53179.65	3.65	340	-3047.45	0.48
2013-10	840	-71679.53	0.88	1310	53184.77	5.99	330	-3047.56	0.72
2014-05	820	-71678.36	0.35	1320	53175.05	3.95	300	-3048.50	0.13
2015-04	800	-71680.60	0.39	1330	53174.06	1.24	290	-3050.05	0.30
2015-10	820	-71683.00	3.14	1344	53179.23	2.71	290	-3049.91	0.42

Превышения между реперами варьируют в пределах первых миллиметров, более повышенные значения приходятся на большие расхождения между двумя ходами нивелирования (Δh). Говорить о какой-либо тенденции в движении реперов по высоте нет оснований.

**Площадка ALMALY.**

Нивелирный профиль в данной конфигурации был заложен в сентябре 2012г (рис.4.2-3).

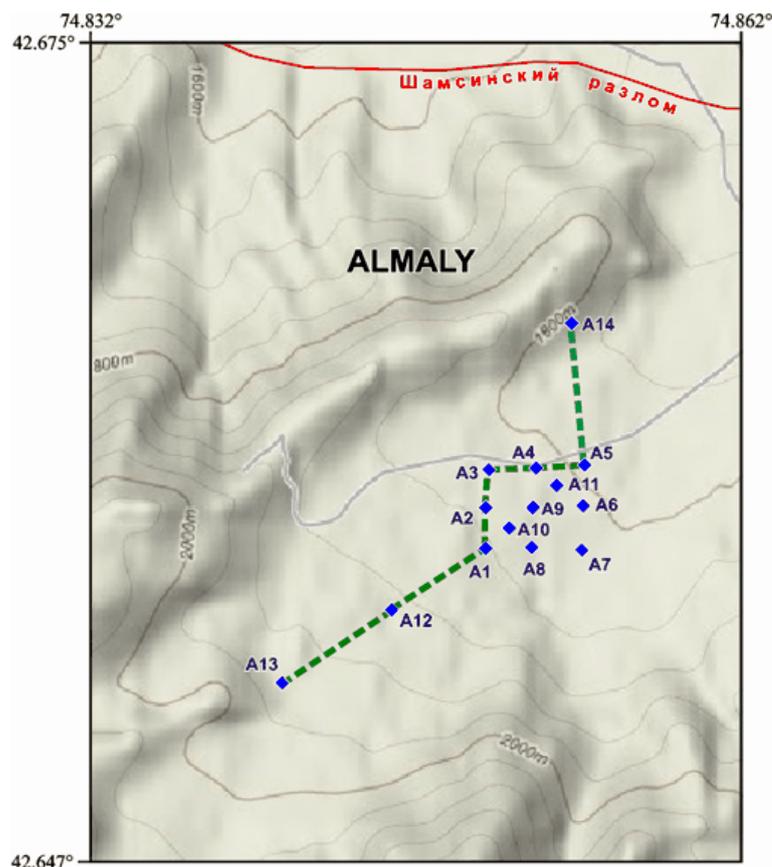


Рисунок 4.2-3 – Нивелирный профиль на площадке ALMALY. Красная линия – активный разлом

На сентябрь 2016 г здесь проведено 9 циклов измерений. Результаты нивелирования по площадке ALMALY сведены в таблице 4.2.3.

Таблица 4.2.3 – Результаты измерений по секциям нивелирного хода для площадки ALMALY.

Год-месяц	Секция нивелирования; L – длина хода (м); h – превышение реперов (мм); Δh – ошибка (мм)													
	A12=13		A1=12		A1=2		A2=3		A3=4		A4=5		A5=14	
	L≈610	L≈460	L≈185	L≈215	L≈190	L≈220	L≈600							
	h	Δh	h	Δh	h	Δh	h	Δh	h	Δh	h	Δh	h	Δh
2012-09	58182.6	0.3	44358.8	0.2	-10702.4	0.2	-13103.9	0.0	-12256.8	0.2	-13428.6	0.1	-29537.3	0.3
2013-04	58181.5	1.1	44357.8	1.5	-10702.6	0.7	-13104.1	1.0	-12257.6	0.0	-13428.7	0.2	-29537.5	0.2
2013-08	58181.3	0.4	44357.9	1.4	-10701.9	0.1	-13104.3	0.9	-12257.2	0.8	-13428.7	0.2	-29537.3	0.8
2013-10	58182.5	0.0	44358.5	1.0	-10702.3	0.2	-13104.1	0.5	-12256.5	0.3	-13428.7	0.0	-29537.4	0.1
2014-04	58181.1	0.3	44358.2	0.2	-10701.7	0.1	-13103.9	0.4	-12256.2	0.3	-13428.5	0.4	-29537.6	0.4
2015-05	58181.9	0.0	44358.8	0.1	-10701.9	0.1	-13105.1	0.2	-12256.5	0.2	-13428.9	0.1	-29536.6	0.1
2015-09	58182.6	0.5	44358.2	0.4	-10702.3	0.1	-13105.6	0.0	-12255.8	0.0	-13428.9	0.0	-29537.2	0.2
2016-06	58180.4	0.0	44359.4	0.5	-10702.1	0.1	-13104.6	0.4	-12256.5	0.1	-13429.0	0.0	-29538.9	0.0
2016-09	58181.9	0.1	44357.5	0.1	-10702.3	0.0	-13104.9	0.1	-12255.9	0.2	-13428.4	0.2	-29538.4	0.6

Также как и на других площадках, здесь существенных изменений превышения между реперами не фиксируется. Отклонения превышений варьируют в пределах 1-2 мм без проявления какого-либо тренда в движении по вертикали. Из всех площадок здесь оценки ошибок нивелирования – наилучшие. Так максимальное  $\Delta h \leq 1.5$  мм, а в среднем  $\Delta h = 0.3$  мм. Приписывать

возвратно-поступательным вариациям вертикальной компоненты геодинамический фактор нет веских оснований.

### **4.3 Данные GPS измерений на детальных площадках**

Обработка GPS данных примерно на год задерживает получение векторов скорости и координат с момента измерений. С ноября 2012 г по декабрь 2015 г нами обработано 13 циклов GPS измерений по площадкам POLIGON и KENTOR. Для перманентных станций площадки ALMALY выбраны данные за соответственные интервалы измерений.

#### ***Данные GPS наблюдений на площадке POLIGON.***

С каждого из 6 реперов площадки POLIGON возможно с тех же позиций проводить линейно-угловые и GPS измерения. Исторически сложилось так, что репера называются POLY и POL3 для GPS наблюдений, а для ЛУИ – соответственно P0 и P1. Остальные реперы имеют соответствие по номерам: IP02 = P2, ..., IP05 = P5. Как и в прошлом году для обработки текущего года осталась не решенной техническая проблема отсутствия части измерений 2014-2015 гг. для пунктов POLY и IP02. Для остальных пунктов площадки получены координаты по 13 циклам измерений. Также, полученные из GAMIT/GLOBK вертикальные компоненты векторы скорости малопригодны для дальнейшего анализа, т.к. у них прописаны неправильные высоты антенн. Однако исправленные временные ряды координат (ВРК) и на их основе рассчитанные векторы скорости могут быть использованы для понимания кинематики движений в районе площадки.

Корректировка высот осуществлялась в геодезических координатах LLA (долгота, широта, высота), которые были пересчитаны в геоцентрические картезианские – XYZ. Затем все доступные для площадки позиции реперов переведены в локальные топоцентрические – NEH, с началом координат в средней позиции по всем данным измерений площадки.

Для исключения влияния удаленной системы отсчета (CO) EURA-2008 из локальных топоцентрических координат NEH на каждую расчетную дату вычтем координаты пункта IP03, который выступит в качестве системы отсчета – позиция наблюдателя. Т.е. нами допускается, что объем земной коры в радиусе первых метров вокруг тумбы IP03 является жестким телом с привязанной к нему ортогональной системой координат (север-восток-вверх) и начало которой совмещено с координатами репера IP03 на моменты GPS измерений. В результате такой процедуры временные ряды топоцентрических координат пунктов площадки  $NEH_{EURA}$  трансформируются в координаты  $NEH_{IP03}$ . Позиция пункта IP03 будет в начале координат для всех измерений, т.е. координаты будут всегда равны нулю. Такая стабилизация дала эффект сокращения среднего интервала вариаций ВРК в ~3.7 раза с 35.56 до 9.50 мм.

На рисунке 4.3-1 показаны две векторные системы скорости для пунктов площадки POLIGON с позицией наблюдателя на пункте IP03.

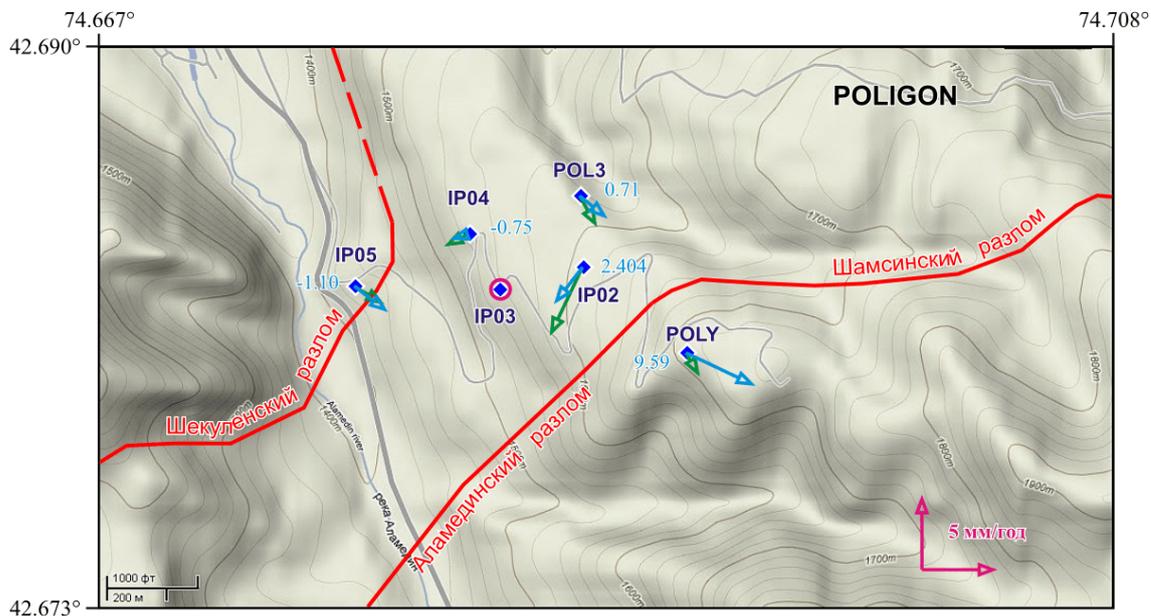


Рисунок 4.3-1 – Векторы скорости для GPS реперов площадки POLIGON, относительно пункта IP03, измерения за 2012-2015 гг. Зеленые – рассчитанные программой GAMIT/GLOBK. Голубые – рассчитанные через стабилизацию ВРК всех реперов относительно пункта IP03. Числа – вертикальная скорость пункта, мм/год.

Зеленым цветом здесь показаны векторы скорости, рассчитанные в CO EURA-2008 программой GAMIT/GLOBK и уменьшенные на вектор скорости пункта IP03. Голубым цветом отражены векторы скорости, полученные в результате описанных выше преобразований ВРК. Для этих векторных систем максимальные отличия (до 4.14 мм/год) приходится на пункты POLY и IP02, это результат недостаточности объема данных измерений для этих пунктов. Для остальных пунктов наблюдения векторы скорости в разных системах отсчета различаются в среднем на 0.65 мм/год. На основе представленных векторов скорости, данного интервала и количества измерений пока рано делать заключения об устойчивой кинематике движений реперов для площадки POLIGON. Однако уже сейчас обращает на себя внимание прямая зависимость вертикальной компоненты скорости от гипсометрического положения репера. Максимальное значение вертикальной скорости 9.59 мм/год отмечено для пункта POLY и его высота – 1688 м. Минимальная вертикальная скорость -1.10 мм/год у пункта IP05 при высоте 1394 м.

#### ***Данные GPS наблюдений на площадке KENTOR.***

В состав площадки KENTOR входит 6 реперов комплексного геодезического наблюдения, из них GPS измерения проводятся только на 4 пунктах: IK02, IK03, IK05 и IK06. Для всех пунктов площадки рассчитаны координаты по 14 циклам измерений. Здесь также часть измерений у всех

пунктов прошла в обработку единого решения с ошибками в высоте антенн. Это обстоятельство также помешало здесь получить качественные векторы скорости по вертикальной компоненте и ВРК для дальнейшего анализа.

Поэтому на площадке KENTOR также были скорректированы высоты антенн и для всех доступных ВРК рассчитаны локальные топоцентрические координаты NEH. В качестве основы для стабилизации выбран пункт IK05, его положение на самом южном геологическом блоке позволит проще представить схему движений на всей площадке (рис. 4.3-2).

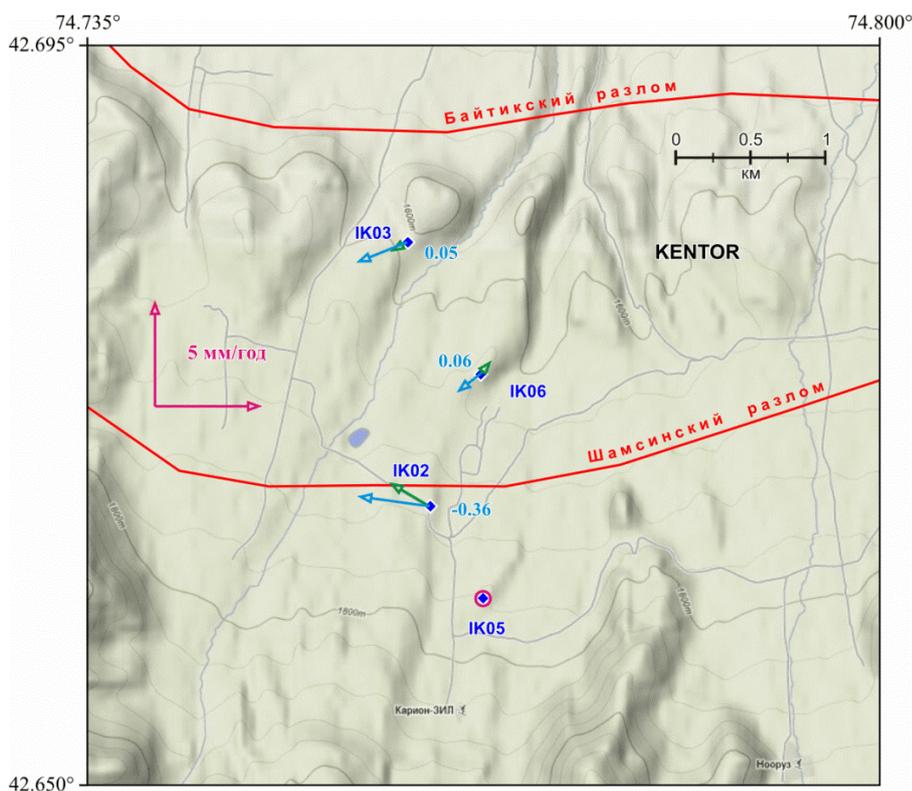


Рисунок 4.3-2 – Векторы скорости для GPS реперов площадки KENTOR, относительно пункта IK05, измерения за 2012-2015 гг. Зеленые – рассчитанные программой GAMIT/GLOBK. Голубые – рассчитанные через стабилизацию ВРК всех реперов относительно пункта IK05. Числа – вертикальная скорость пункта, мм/год.

Поместив наблюдателя в пункт IK05 можно анализировать, как относительно него движутся остальные пункты площадки (рис. 4.3-2). Очевидно, что для площадки KENTOR отмечаются более значительные расхождения в системах векторов скорости, рассчитанных в GLOBK (зеленые) и по схеме локальной стабилизации временных рядов координат (голубые). Среднее расхождение между одноименными векторами составляет 1.66 мм/год, что не является сильно критичным по уровню и превышающим допустимые 1-2 мм ошибки. Кроме того, заметно, что различие в системах векторов стабильно на один и тот же вектор, который если прибавить к зеленой системе, то получим голубую систему векторов. Таким образом, в структурно-кинематическом плане эти векторные системы не принципиально отличаются друг от друга.

Следует отметить, что максимальное различие в векторах скорости приходится на соседние векторы скорости ИК05 и ИК02, и составляет  $\sim 2$  мм/год в горизонтальном плане и 0.36 мм/год по вертикали. Такая ситуация отмечалась и в прошлом году, возможно следует рассмотреть вопрос о смещении линии разлома к югу от пункта ИК02. Тогда у Шамсинского разлома отчетливо проявится лево-сдвиговая составляющая, которая существенно превышает взбросовую компоненту поперечного укорочения.

#### *Данные GPS наблюдений на площадке ALMALY.*

На площадке ALMALY установлены 4 перманентные GPS станции: IAT1, IAT3, IAT5 и IATA. Для станций непрерывного наблюдения за сентябрь 2012 г – декабрь 2015 г нами получено от 216 до 280 позиций с интервалом осреднения данных 2-5 дней (в среднем 4 дня). К сожалению, рассчитанные временные ряды координат для этих пунктов, скорее всего, не свободны от ошибочных высот антенн, которые выявить и исправить оперативно не удалось. Необходима тщательная проверка большого количества данных и переобработка всей информации. Весьма вероятно, эти ошибки создают длительные (3-7 месяцев) аномалии по высоте  $\pm 65$ -85 мм с выдержанными уровнями (полочками).

На основе имеющихся данных для площадки ALMALY имеет смысл представить только векторы скорости, полученные при расчете программой GAMIT/GLOBK, и рассчитанные на основе временных рядов с исключением экстремальных значений координат ( $>20$  мм) относительно ближайших измерений (рис. 4. 3-3).

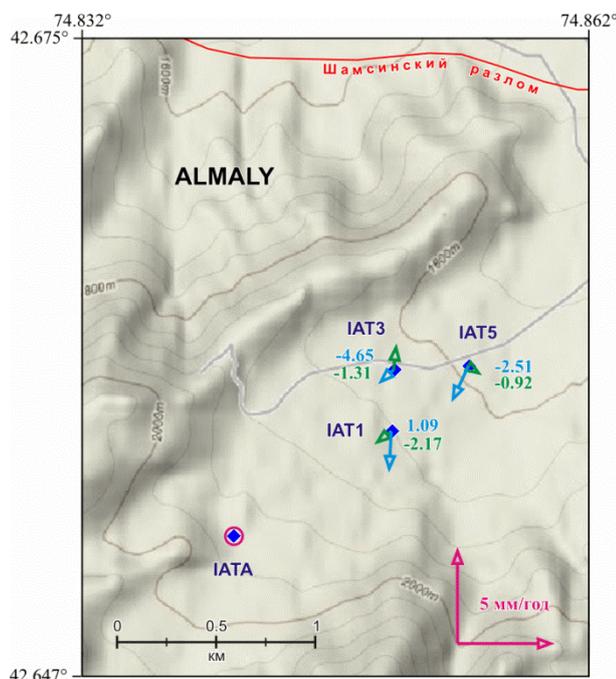


Рисунок 4.3-3 – Векторы скорости для GPS реперов площадки ALMALY, относительно пункта IATA, измерения за 2012-2015 гг. Зеленые – рассчитанные программой GAMIT/GLOBK. Голубые – рассчитанные по ВРК без экстремальных значений

относительно пункта IATA. Числа – вертикальные скорости пункта, мм/год.

Уровень относительных смещений реперов в плане < 2-3 мм/год с преобладающей южной направленностью движений. Среднее отличие векторных систем в плане составляет 1.6 мм/год. Большой уровень доверия можно отнести к голубым векторам скорости, рассчитанным с вычетом всех экстремальных значений. Т.е. в этом случае можно быть уверенным, что эти скорости относятся к устойчивым фоновым движениям реперов площадки ALMALY.

Для получения более качественных кинематических и деформационных характеристик необходимо продолжить исследование площадок GPS методом.

#### **4.4 Особенности проявления многолетних деформационных процессов на площадке ALMALY по данным GPS-наблюдений**

По результатам линейно-угловых и GPS-измерений за 2006-2008 гг. на площадках ALMALY и NORUS (в ~5 км западнее) было зафиксировано синхронное упругое деформирование северных базовых линий (БЛ) площадок [Kuzikov, 2010; Кузиков, Образцова, 2011]. Здесь отмечено 2 цикла анизотропных в горизонтальном плане деформаций БЛ продолжительностью по ~4 месяца. Максимальные изменения длин БЛ на площадках составили: по долготе – до -18 мм на 403 м ( $-4.5 \times 10^{-5}$ ) и по широте – до 14 мм на 150 м ( $9.3 \times 10^{-5}$ ). Велика вероятность того, что эти деформации связаны с влиянием ослабленной зоны активного Шамсинского взброса или его опережающих разломов.

В 2012-2014 гг. по данным еженедельных линейно-угловых измерений здесь вновь были зафиксированы 2 аналогичных деформационных всплеска. Очевидная цикличность в проявлении геодинамической активности на исследуемых объектах требует более детального анализа. В нашем случае наиболее подходящими являются данные позиционирования постоянно действующих GPS станций IAT1, IAT3, IAT5. Положение БЛ IAT1-3 позволяет оценить деформационные характеристики земной коры между реперами в направлении С-Ю, а данные по БЛ IAT3-5 способны охарактеризовать вариации длины в направлении В-З. На текущий момент рассчитаны временные ряды координат для GPS-пунктов площадки ALMALY с дискретностью в 5 дней. В редких случаях такая дискретность может уменьшаться, иногда – увеличиваться, максимально до 2-х месяцев. Но в общем случае временные ряды координат исследуемых пунктов представлены довольно хорошо и пригодны для обозначенных выше целей анализа. В качестве входных данных мы используем геоцентрические картезианские координаты XYZ, рассчитанные программой GAMIT/GLOBK в системе отсчета EURA-2008 за интервал наблюдений 2005-2014 гг.

При этом оценки ошибок для значений координат составляют в среднем до 5-6 мм по интервалу осреднения, для оси X средние оценки ошибок уменьшаются до 3-4 мм. Всего количество фиксированных значений координат XYZ для пунктов площадки ALMALY составляет

около 600 значений для временного интервала от 31.07.2005 до 31.12.2014. Из опытно-методических работ 2009г на этих же пунктах площадки известно, что уровень вариаций координат реперов в 5-8 раз больше уровня изменений длины БЛ [Кузиков, Образцова, 2011]. Т.е. длина БЛ является значительно более устойчивой величиной с течением времени, чем любая из координат любого GPS репера. Поэтому преобразуем временные ряды координат XYZ для 3-х реперов площадки ALMALY в вариации длин БЛ IAT1-3 (меридионального направления) и БЛ IAT3-5 (широтного направления). При этом более чем втрое сокращается объем анализируемых данных, стабилизируется параметр исследования и появляется возможность прямого сопоставления GPS-длин БЛ с данными линейно-угловых измерений.

Для целей исследования изменения параметров с течением времени абсолютные значения длин БЛ не имеют первостепенного значения, в этом случае больший интерес представляют относительные вариации приращения длины БЛ. Поэтому проведем процедуру центрирования для выборки длин каждой БЛ, другими словами из каждого значения выборки длины БЛ вычтем среднее по данной выборке. Таким образом, графическому представлению и анализу подлежат: дробный год, центрированные длины БЛ (d1-3 и d3-5). Вся цифровую информацию о вариациях длин исследуемых БЛ площадки ALMALY можно представить в сконцентрированном графическом виде (рис. 4.4-1).

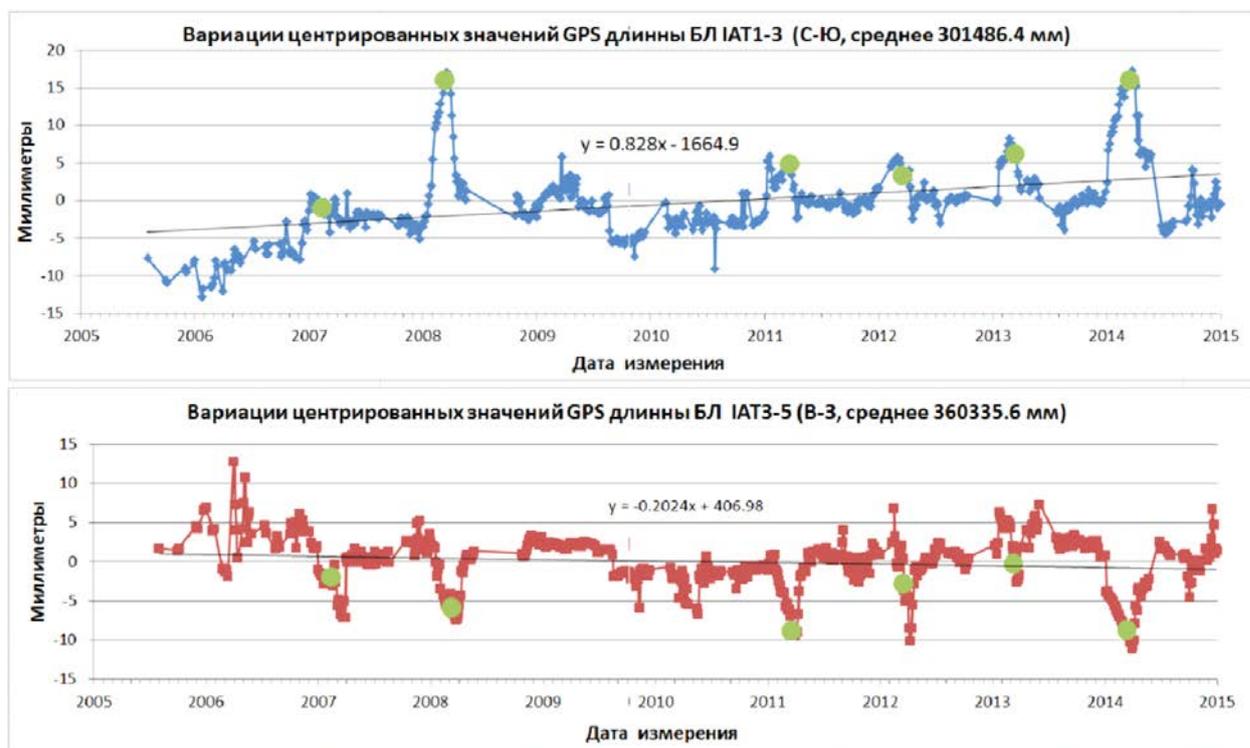


Рисунок 4.4-1 – Графики изменения длин базовых линий относительно средних значений. Верхний – для БЛ IAT1-3, средней длины 301486.4 мм и ориентированной меридионально. Нижний – для БЛ IAT3-5, средней длины 360335.6 мм и ориентированной восток-запад. Черные наклонные линии и формулы – прямолинейные аппроксимирующие тренды. Круглые маркеры – синхронные значимые события на вейвлет-спектрограммах (см. ниже).

На рисунке 4.4-1 обращает на себя внимание симметричность графиков, соответствующих северному и восточному направлениям. Если прямолинейный тренд БЛ IAT1-3 имеет скорость общего удлинения 0.83 мм/год, то для тренда БЛ IAT3-5 характерна тенденция общего укорочения -0.2 мм/год. При этом все основные случаи длительного упругого удлинения отмечаются только по направлению С-Ю, и основные события продолжительного упругого укорочения фиксируются в направлении В-З. Коэффициент корреляции между временными рядами вариаций длин БЛ IAT1-3 и IAT3-5 равен -0.5, что свидетельствует о противоположенных процессах деформации (анизотропии) по отношению к сторонам света. При этом можно отметить некоторые временные участки на графиках, на которых характеризуются однонаправленными изменениями длин БЛ.

Для выявления закономерностей в периодичности деформационных процессов применим к временным рядам длин БЛ вейвлет-преобразование. Данная процедура выполнена в программе MatLab 7.0.4, где вейвлет-преобразование осуществлено по формуле:

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) * \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

где  $W_f(a,b)$  – значения вейвлет-коэффициентов;  $f(t)$  – исследуемый временной ряд;  $a$  – параметр непрерывного масштабного преобразования  $\psi(t)$ ;  $b$  – параметр непрерывного переноса  $\psi(t)$  вдоль оси времени. В нашем случае в качестве материнского вейвлета выступает вейвлет Хаара.

Спектр  $W_f(a,b)$  для одномерного сигнала есть поверхность в трехмерном пространстве. По горизонтальной оси отложены значения  $b$  (сдвиг по времени), по вертикальной оси – значения  $a$  (масштаб или размер вейвлета), а значения коэффициентов вейвлет-преобразования  $W_f(a,b)$  кодируются различными оттенками цвета. Графическое представление вейвлет-спектрограмм для исследуемых БЛ отражено на рисунке 4.4-2.

Для изучения временных рядов БЛ IAT1-3 и БЛ IAT3-5 оказалось достаточным использование значений  $a$  (масштабирование) от 1 до 256 (шаг 1) и значений  $b$  (сдвиг по времени) в пределах всего временного ряда GPS-наблюдений. Из (1) и (2) следует, что малые значения  $a$  соответствуют высоким частотам. Таким образом, вейвлет-преобразование сигнала начинается с высоких и заканчивается низкими частотами, от нижних срезов спектрограммы – к верхним (соответственно). Из вейвлет-спектрограмм Хаара (рис. 4.4-2) следует, что темные области соответствуют отрицательным, а светлые – положительным значениям вейвлет-коэффициентов  $W_f(a,b)$ . Также светлые области отражают тенденцию укорочения длин БЛ, а темные цвета – тенденцию удлинения. Соответственно, четкие границы между областями, в которых  $W_f(a,b)=0$ , соответствуют экстремальным значениям длин БЛ. На наш взгляд, данный вид вейвлет-спектрограмм наилучшим образом отражает общие закономерности в проявлении деформационных циклов для анализируемых данных.

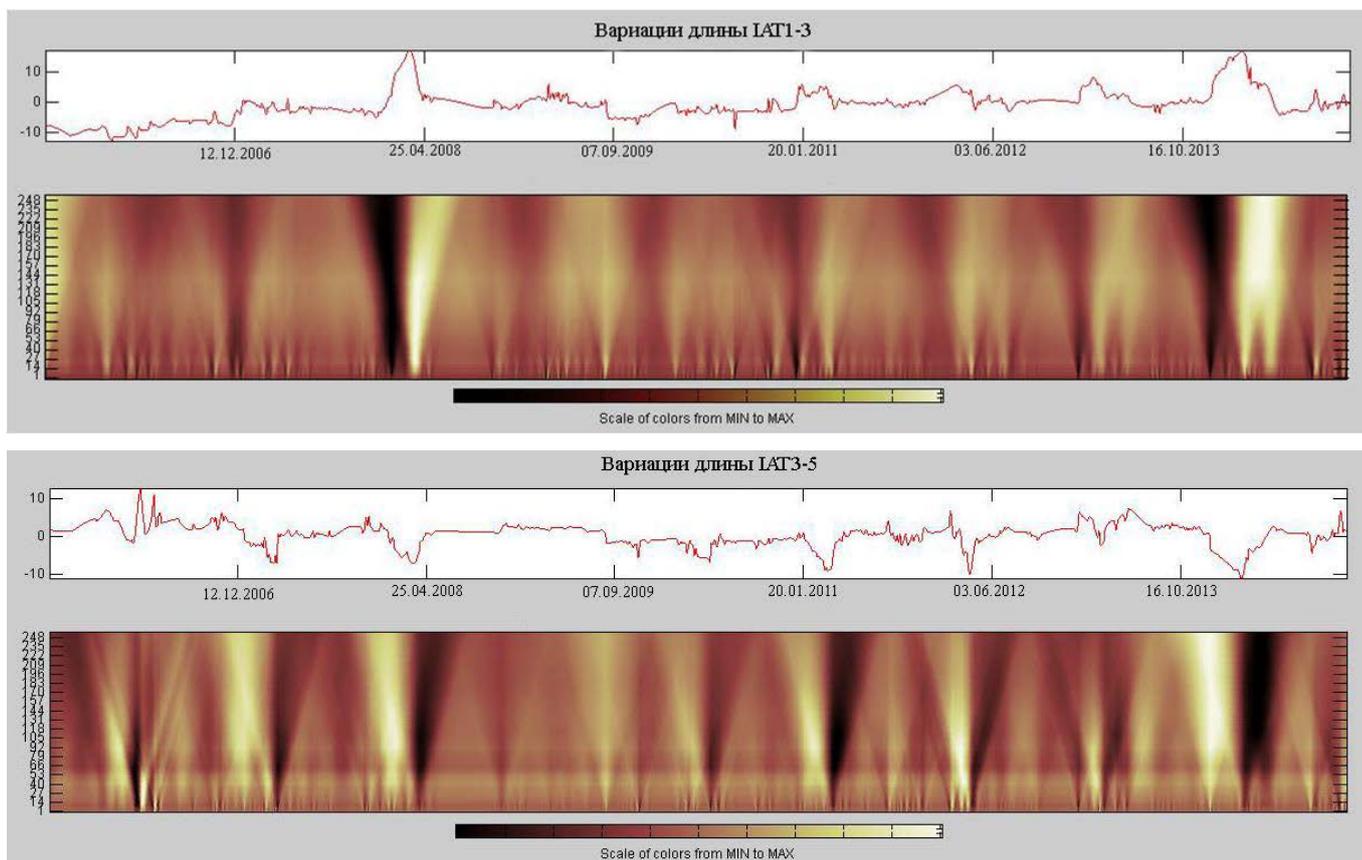


Рисунок 4.4-2 – Графики вариаций длин базовых линий, совмещенные с вейвлет-спектрограммами (Хаара, MatLab). Верхний – для БЛ IAT1-3 (ср. дл. 301486.4 мм, С-Ю); нижний – для БЛ IAT3-5 (ср. дл. 360335.6 мм, В-З).

Поскольку высокочастотные и малоамплитудные колебания длин БЛ могут быть сопряжены с ошибками GPS-метода позиционирования, то в данной ситуации больший интерес представляют проявления низкочастотных деформаций с большой амплитудой (относительно крупные деформационные события). Такие события на спектрограммах хорошо проявлены вертикальными (не наклонными) линиями раздела между светлыми и темными областями. Чем больше амплитуда деформационного события, тем выше контрастность между сменой цветовой гаммы. Нами выделено 6 таких циклов упругой анизотропной деформации, которые проявились по двум направлениям БЛ IAT1-3 и IAT3-5 (рис. 4.4-2). В среднем такие события происходят через 370 дней, и даже промежутки времени (2005-2006, 2008-20010 гг.) без явно выраженных анизотропных деформаций удовлетворяют кратности этой периодичности. В тоже время на каждой из БЛ можно выделить незначительные деформационные всплески (кратные 370 дням) либо с неявным проявлением, либо не имеющие характера анизотропии в горизонтальном плане.

Таким образом, на основе данных GPS-наблюдений для разно ориентированных БЛ IAT1-3 (С-Ю) и IAT3-5 (З-В) площадки ALMALY удалось установить наличие здесь периодически повторяющихся значительных упругих и постепенно накапливающихся остаточных деформаций. Причем фиксируется обратная зависимость в проявлении деформации (корреляция -0.5): в

северном направлении регулярно проявляется удлинение, а в восточном – укорочение. На основе вейвлет-спектрограмм удалось установить регулярную периодичность деформационных анизотропных событий, которая составляет  $\sim 1$  год (370 дней). В среднем начало каждого из деформационных событий приходится на 25 декабря с вариациями до  $\pm 35$  дней, среднее окончание событий приходится на 10 мая  $\pm 45$  дней. При этом средняя продолжительность деформационного цикла 4-5 месяцев, как правило, с запаздыванием на 20-30 дней событий по восточному направлению (IAT3-5). По направлению С-Ю максимальные приращения длин до 20-22 мм ( $7.3 \times 10^{-5}$ ) отмечаются в 2008 и 2014 гг., в остальных случаях увеличение длины БЛ в 301 м не превышает 7-10 мм. При этом в направлении В-З длина БЛ в 360 м уменьшалась на 8-16 мм (до  $-4.3 \times 10^{-5}$ ). В качестве будущих исследований для данного направления анализа интерес представляет увеличение количества реперов и БЛ для оценки пространственного проявления выше обозначенных деформационных событий. Для этих же целей важно будет привлечь результаты линейно-угловых измерений.

## Заключение

Уже 25 лет без перерыва сотрудники ИС РАН проводят GPS наблюдения за деформационными параметрами на территории Центральной Азии. Данный регион имеет ключевое значение для понимания геодинамических процессов протекающих в активной зоне сочленения Азиатской и Индийской плит. Чередование разнородных блоков земной коры (Казахский щит, горные массивы Тянь-Шаня и Памира, Таримская впадина) позволяет наблюдать за современными движениями не только внутри этих географических единиц, но и дает возможность оценить характер взаимодействия между ними. В этом отношении наиболее изученным является регион Тянь-Шаня, где сосредоточены разномасштабные геодезические, сейсмологические, геологические и другие виды наблюдений. Так силами ИС РАН развивается уникальная в рамках СНГ обобщенная система детальных наблюдений за деформациями земной коры методами спутниковой геодезии и сейсмологии. Анализ результатов этих наблюдений выявил сходство и различия в деформационных процессах в плане и на разных глубинах, что вносит уточняющие данные не только в особенности горообразования на Тянь-Шане, но и проясняет общие черты для подобных процессов коллизии земной коры.

В течение последних лет комплексного наблюдения сначала было отмечено, что средние направления главных осей горизонтальной деформации для Центрального Тянь-Шаня совпадают до первых градусов на основе приповерхностных GPS и глубинных сейсмологических данных. Затем нами была установлена пространственная корреляция этих параметров в плане. По результатам работы прошедшего года были рассчитаны значения скорости горизонтальной деформации на основе GPS и сейсмологических данных.

В прошлом году в районе гор Джумгал-Тоо был выделен блок земной коры с дисгармоничным распределением приповерхностной и глубинной деформации, который может рассматриваться как потенциально опасный, с точки зрения проявления сейсмических событий и активности разрывных нарушений. В этом году для этой же территории рассчитаны динамические параметры для события с  $\Delta\sigma > 10$  бар, которые произошли здесь за 1998-2014 гг. Эти события попали в область приповерхностного изменения площади от  $-20E-9$  до  $30E-9$  год<sup>-1</sup> и практически отсутствуют в области максимальных деформационных значений. Это обстоятельство дополнительно свидетельствует о потенциальной опасности этого района и требует дальнейшего его исследования.

Не меньшей интерес представляют данные многолетних линейно-угловых наблюдений на детальных геодезических площадках, приуроченных к зонам активных разрывных нарушений. Здесь выявлены достоверные значимые деформационные всплески базовых линий различной интенсивности, продолжительности и площадного охвата. Определение генезиса данных деформационных аномалий и выявление возможных их связей с другими геофизическими

данными представляют повышенный интерес для геодинамических исследований в данном регионе и для понимания фундаментальных закономерностей развития земной коры в целом.

Помимо создания базы данных уникальных геофизических параметров и особенностей проявления наблюдаемых полей, в рамках данной темы развиваются технологии повышения точности исследуемых параметров и алгоритмов их обработки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аки К. Количественная сейсмология / К. Аки, П. Ричардс. – М.: Мир, 1983. –Т.1-2. – 880с.
2. Аптекман Ж.Я. Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага / Ж.Я. Аптекман, Ю.Ф. Белавина, А.И. Захарова и др. // Вулканология и сейсмология. – 1989. – №2. – С. 66-79.
3. Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования / С.С. Арефьев. – М.: ИКЦ Академкнига, 2003. – 375с.
4. Бурымская Р.Н. Спектральный состав излучения и очаговые параметры землетрясений северо-западной части Тихого океана за 1969-1996 годы / Р.Н. Бурымская // Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений Северо- Запада Тихого океана / Отв. ред. А.И. Иващенко. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. – Т.1. – С.48-67.
5. Горбунова И.В. Экспериментальные характеристики излучения очагов слабых землетрясений / И.В. Горбунова, З.А. Кальметьева. – Бишкек: Илим, 1988. – 127с.
6. Зубович А.В. Современная кинематика Тарим–Тянь-Шань–Алтайского региона Центральной Азии (по данным GPS измерений) / А.В. Зубович, Р.Т. Бейсенбаев, В. Сяочан [и др.] // Физика Земли, 2004. – № 9. – С. 31-40.
7. Кальметьева З.А. Модели очаговых зон сильных землетрясений / З.А. Кальметьева, Т.А. Мельникова, Е.В. Мусиенко, Ф.Я. Юдахин // Типовые геолого-геофизические модели сейсмичных и асейсмичных районов. – Бишкек: Илим, 1992. – С. 124-13.
8. Ключевский А.В. Динамические параметры очагов землетрясений Байкальской сейсмической зоны / А.В. Ключевский, В.М. Демьянович // Физика Земли. –2002. – №2. – С.55-66.
9. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения / Б.В. Костров. – М.: Наука, 1975. – 175с.
10. Костюк А.Д. Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии / А.Д. Костюк, С.Л. Юнга, Л.М. Богомолов, Н.А. Сычева, Ю. Яги (Y. Yagi) // Физика Земли. – 2010. – № 3. – С.52-65.
11. Кузиков С.И. Структурный анализ горизонтальных скоростей по данным GPS и характер современной деформации земной коры Центральной Азии: Дисс. канд. физ.-мат. Наук / Кузиков Сергей Иванович. – Москва: ИФЗ РАН, 2007. – 167с.
12. Кузиков, С.И. Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS сети / С.И. Кузиков, Ш.А. Мухамедиев // Физика Земли. – 2010. – № 7. – С. 33–51.
13. Кузиков С.И., Образцова Т.С. Особенности наблюдений на геодезических площадках Бишкекского геодинимического полигона / С.И. Кузиков, Т.С. Образцова // Современные проблемы геодинимики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: тезисы докладов 5-го Международного симпозиума, г. Бишкек, 19-24 июня 2011 г. – Бишкек: НС РАН, 2011. – Т. 2. – С.41-44.
14. Кузиков С.И. Точность воспроизведения заданных смещений GPS антенны / С.И. Кузиков, Т.С. Образцова // Вестник КРСУ. – 2011. – Т. 11. – № 4. – С. 129-134.

15. Мансуров А.Н. Поле скорости современной деформации земной коры Северного и Центрального Тянь-Шаня по данным наблюдений ЦА-GPS-сети / А.Н. Мансуров // Вестник КРСУ. – 2016. – Т.16. – №1. – С.157-160.
16. Ризниченко Ю. В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент / Ю. В. Ризниченко // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука. – 1976. – С.9-27.
17. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии / Ю. В. Ризниченко. – М.: Наука, 1985. – 408 с.
18. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Отв. ред. В.И. Макаров. – М.: Научный мир. – 2005. – 400 с.
19. Соколовский В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.
20. Сычев А.С., Коновалов А.В. Сброшенные напряжения афтершоковых последовательностей землетрясений (на примере Юга о. Сахалин) / А.С. Сычев, А.В. Коновалов // Современная тектонофизика: Методы и результаты. Материалы третьей тектонофизической школы-семинара. – М.: ИФЗ, 2013. – Т.1. – С.303-309.
21. Сычева Н.А. Обновленные материалы по механизмам очагов и сеймотектоническим деформациям земной коры Тянь-Шаня / Н.А. Сычева, С.Л. Юнга // Труды конф. с междунар. участием (Новосибирск, 03–06 октября, 2011 г.). – Новосибирск, 2011. – С.151-156.
22. Сычева Н.А. Падение напряжения в очагах среднемагнитудных землетрясений в Северном Тянь-Шане / Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов // Физика Земли. – 2014. – №3. – С.142-153.
23. Сычева Н.А. Сеймотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) / Н.А. Сычева Н.А., С.Л. Юнга, Л.М. Богомолов, В.А. Мухамадиева // Физика Земли. – 2005. – № 11. – С.62-78.
24. Чедия О. К. Морфоструктуры и новейший тектогенез Тянь-Шаня / О.К. Чедия. – Фрунзе: Илим, 1986. –313с.
25. Юнга С.Л. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу / С.Л. Юнга // Докл. РАН. – 1997. – Т.352. – № 2. – С.253-255.
26. Ameri G. Separation of source and site effects by generalized inversion technique using the aftershock recordings of the 2009 L'Aquila earthquake / G. Ameri, A. Oth, M. Pilz, D. Bindi, S. Parolai, L. Luzi, M. Mucciarelli, G. Cultreri // Bull Earthquake Eng. DOI 10.1007/s10518-011-9248-4.
27. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes / J.N. Brune // J. Geophys. Res. – 1970. – V.75. – P.4997-5009.
28. Dziewonski A.M. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity / A.M. Dziewonski, T.A. Chou, and J.H. Woodhouse // J. Geophys. Res. – 1981. – No.86. – P.2825-285.
29. Estey L.H. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data / L.H. Estey, C.M. Meertens // GPS Solutions (pub. by John Wiley & Sons). – 1999. – Vol. 3, N 1. – P. 42–49.
30. Gurtner W. RINEX: The Receiver-Independent Exchange Format / W. Gurtner // GPS World. – 1994. – Vol. 5, N 7.

31. Gurtner W. RINEX: The Receiver-Independent Exchange Format. Version 3.03 [Электронный ресурс] / W. Gurtner, L. Estey. – 2015. – P. 95. – Режим доступа: <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf> .
32. Hamburger M.W. Results from a GPS geodynamic network in the Tien Shan mountains, Kirgystan and Kazakhstan. CIS / M.W. Hamburger, X.D. Song, B.H. Hager [et al.] // Europ. Geophys. Soc. Meeting – Grenoble, 1994. – P. 52-54.
33. Herring T.A. Introduction to GAMIT/GLOBK: Release 10.6 / T.A. Herring, R.W. King, M.A. Floyd, S.C. McClusky. – MIT, 2015a. – 50 p.
34. Herring T.A. GAMIT: Reference manual. GPS analysis at MIT: Release 10.6 / T.A. Herring, R.W. King, M.A. Floyd, S.C. McClusky. – MIT, 2015b. – 167 p.
35. Herring T.A. GLOBK: Reference manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program: Release 10.6 / T.A. Herring, R.W. King, M.A. Floyd, S.C. McClusky. – MIT, 2015c. – 95 p.
36. Hofmann-Wellenhof B. GPS Theory and Practice / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger – 4-th rev. ed. – Wien: Springer-Verlag, 1997. – 390 p.
37. Ischuk A. Kinematics of the Pamir and Hindu Kush regions from GPS geodesy / A. Ischuk, R. Bendick, A. Rybin [et al.] // JGR: Solid Earth, 2013. – Vol. 118. – Is. 5. – P. 2408–2416.
38. Kuzikov S. Geodetic estimations of the modern motions on Tien Shan / S.I. Kuzikov // Геофизический журнал. – 2010. – Т.32. – № 4. – С.80-81.
39. Kwiatek G. Source Parameters of Picoseismicity Recorded at Mponeng Deep Gold Mine, South Africa: Implications for Scaling Relations / G. Kwiatek, K. Plenkers, G. Dresen // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2011. – V.101. – No.6. – P.2592-2608. DOI: 10.1785/0120110094.
40. Leick A. GPS satellite surveying / A. Leick – 2-nd ed. – New York: J. Wiley & Sons, 1995. – 560p.
41. Madariaga R. High frequency radiation from dynamic earthquake fault models / R. Madariaga // Ann. Geophys. – 1983. – V.L. – P.17-23.
42. Mohadjer S. Partitioning of India-Eurasia convergence in the Pamir-Hindu Kush from GPS measurements / S. Mohadjer, R. Bendick, A. Ischuk [et al.] // Geophys. Res. Lett. 2010. – Vol. 37. – L04305, doi:10.1029/2009GL041737.
43. Oth A. Spectral Analysis of K-NET and KiK-net Data in Japan, PartII: On Attenuation Characteristics, Source Spectra, and Site Response of Borehole and Surface Stations / A. Oth, D. Bindi, S. Parolai, D. Giacomo // Bulletin of Seismological Society of America. – 2011. – V.101. – No.2. – P.667-687. Doi:10.1785/0120100135.
44. Parolai S. Source Parameters and Seismic Moment–Magnitude Scaling for Northwestern Turkey / S. Parolai, D. Bindi, E. Durukal, H. Grosser, C. Milkereit // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2007. – V.97. – No.2. – P.655-660. doi:10.1785/0120060180.
45. Reasenber P.A. Oppenheimer D. FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaing earthquake fault-plane solutions / P.A. Reasenber, D. Oppenheimer. // California Open-File Report. – 1985. – No. 85-739.
46. Roecker S.W. Three-Dimensional Elastic Wave Velocity Structure of the Western and Central Tien-Shan / S.W. Roecker, T.M. Sabitova, L.P. Vinnik, Y.A. Burmakov, M.I. Golvanov, R. Mamatkanova, L. Munirova // J. Geophys. Res. – 1993. – V.98. – No.B9. – P.15779-15795.

47. Shen Z.-K. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements / Z.-K. Shen, D.D. Jackson, B.X. Ge // Journal of Geophysical Research. – 1996. – 101, 27957-27980.
48. TEQC - The Toolkit for GPS/GLONASS/Galileo/SBAS/Beidou/QZSS Data [Электронный ресурс] / UNAVCO. – Last modified: 09-Nov-2015. – Режим доступа: [www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html](http://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html) .
49. Yagi, Y. Determination of focal mechanism by moment tensor inversion / Y.Yagi Tsukuba: IISEE Lecture Note. –2004. –51 p.
50. Zubovich A.V. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions / A.V. Zubovich, X.-Q. Wang, Y.G. Scherba [et al.] // Tectonics, 2010. – Vol. 29. – TC6014, doi:10.1029/2010TC002772.