

Федеральное агентство научных организаций

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ РАН в г. БИШКЕКЕ**

УДК 551.240+531.1

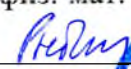
УТВЕРЖДАЮ

№ гос. регистрации 0155-2014-0002

Директор НС РАН в г. Бишкеке,

д-р физ.-мат. наук

Инв. № 01/15

 А. К. Рыбин

“ 17 ”  2015 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

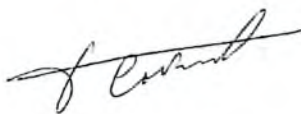
**ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ**

(годовой за 2015 г.)

Раздел 8 "Науки о Земле":

Подраздел 70 «Физические поля, внутреннее строение Земли и глубинные геодинамические процессы»

Руководитель темы
член-корреспондент РАН



Г.А. Соболев

Бишкек 2015 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Исполнители:

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



подпись, дата

Кузиков С.И.
(все разделы)

Ст. науч. сотр. LGPS,
канд. физ.- мат. наук



подпись, дата

Сычева Н.А.
(раздел 2.3)

Инж. -исслед. LGPS



подпись, дата

Саламатина Ю.М.
(разделы 2.1, 3.2)

Рук. группы ГСДН LGPS



подпись, дата

Бакка Б.Н.
(разделы 1.2, 1.3, 4)

Техник ГСДН LGPS



подпись, дата

Прохоров О.А.
(разделы 2.1, 2.2)

РЕФЕРАТ

Отчет содержит 83 страницы, 46 рисунков, 13 таблиц и список использованных источников, включающий 43 наименования.

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

Перечень ключевых слов: GPS, геодезия, вектор скорости, современные движения, землетрясения, фокальный механизм, Тянь-Шань.

Объектом исследования является 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). 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 км²) 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 трех километров.

К вспомогательным, но крайне необходимым методам 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 прошлых лет 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, сеймотектонических деформаций, динамических параметров и кинематических характеристик.

Основные результаты работы:

1. В 2015 г на территории Кыргызского Тянь-Шаня измерено 106 региональных GPS, на 2 пунктах проведены работы по восстановлению набора марок, на 4 пунктах, кроме основной марки, проводились одновременные измерения и на 1-й дополнительной. С учетом декабря 2015 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.
2. Проведен цикл обработки данных GPS измерений за 1994-2014 гг. на территории Центрально-Азиатской сети на основе GAMIT/GLOBK, получен набор из 580 векторов скорости с оценками ошибок, меньшими чем 2мм/год в системе отсчета EURA 2008. Построены карты векторов скорости для 3 масштабных уровней: для всей Центрально-Азиатской GPS сети, для региона Кыргызского Тянь-Шаня, для Бишкекской локальной GPS сети.
3. Дополнен каталог фокальных механизмов очагов землетрясений (1220) по территории KNET за 1999-2014 гг. Построены карты распределения механизмов: взбросы и сбросы. На основе каталога фокальных механизмов построены карты сеймотектонических деформаций. Получены компоненты усредненных тензоров деформации и построены карты их распределения. Построены распределения деформационных характеристик: коэффициент Лодэ-Надаи и угол напряженно-деформированного состояния. На значительной территории KNET установлена высокая степень соответствия для распределения уровней суммарных горизонтальных деформаций по результатам сейсмических и GPS наблюдений. И только в районе гор Джумгал-Тоо отмечаются

повышенные деформации в сейсмоактивном слое 5-15 км и пониженные скорости деформации в приповерхностном слое.

4. База данных GPS наблюдений дополнена поступившей информацией в 2015 г и находится в актуальном состоянии. Предложен алгоритм обработки и стабилизации временных рядов координат GPS марок для локальных территорий. Предложен алгоритм уравнивания данных прямых и обратных линейно-угловых наблюдений, развивающийся по двум направлениям: с учетом временного ряда и избыточных данных одного цикла измерений. Алгоритмы находятся в стадии опробования и написания программ.
5. На 3-х геодезических площадках Бишкекского геодинимического полигона в 2015 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. По характеру вариаций длин выделены 3 вида аномалий с различными генетическими факторами. На основе GPS данных за 2012-2014 гг. наблюдений построены временные ряды и карты векторов скорости в различных системах отсчета. Установлены количественные и кинематические особенности долговременных движений для реперов площадок относительно разрывных нарушений.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 Исследование современных движений земной коры на основе измерений GPS сети Центральной Азии	9
1.1 Космогеодезические наблюдения на территории Центральной Азии	9
1.2 Измерения региональных GPS пунктов в Киргизстане	11
1.3 Измерения в пределах Бишкекской локальной GPS сети.....	13
1.4 Измерения на перманентных станциях Центрально-Азиатской GPS сети.	14
2 Изучение пространственно-временной структуры поля скорости движений на территории Центральной Азии, сопоставление с геолого-геофизическими данными	17
2.1 Порядок обработки данных GPS измерений.....	17
2.2 Векторы скорости на разных масштабных уровнях в пределах Центрально-Азиатской GPS сети.....	19
2.3 Фокальные механизмы очагов и сейсмотектонические деформации Северного Тянь-Шаня по данным сети KNET за 1994-2014 гг.	22
2.3.1 Расчет фокальных механизмов очагов.....	22
2.3.2 Анализ фокальных механизмов очагов.....	27
2.3.3 Расчет сейсмотектонических деформаций Северного Тянь-Шаня	32
2.3.4 Сравнение полученных результатов с GPS данными	42
3 Разработка программных средств систематизации и методов обработки данных геодезических наблюдений для геодинамического анализа.....	45
3.1 Разработка алгоритма стабилизации временных рядов координат GPS марок.....	46
3.2 Разработка алгоритма уравнивания данных прямых и обратных линейно-угловых измерений	50
4 Изучение режима деформации на сегментах разломов по данным комплексных геодезических наблюдений на детальных площадках	56
4.1 Данные линейно-угловых наблюдений	57
4.2 Нивелирование геодезических площадок	66
4.3 Данные GPS измерений на детальных площадках.....	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	78
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	80

ВВЕДЕНИЕ

Система глобального позиционирования (GPS) основывается на группировке искусственных спутников Земли (до 31), 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 об внутренних процессах Земли. Полученные 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 Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (НС РАН). По признанию специалистов Центрально-Азиатская (ЦА) GPS сеть является одной из самых крупных и длительно функционирующих сетей в мире. Эта сеть 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 2015 г, в основном, эти работы охватывают территорию Киргизского Тянь-Шаня.

В первой главе приводятся особенности исследований на Центрально-Азиатской 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 Центральной Азии с использованием GPS данных за 1994-2014 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, KENTOR и ALMALY.

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

1.1 Космогеодезические наблюдения на территории Центральной Азии

С 1992 г и по настоящее время на территории Центральной Азии НС РАН проводит GPS измерения. Силами сотрудников НС 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.

Под Центрально-Азиатской (ЦА) GPS сетью на текущий момент 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 НС РАН. Эта территория охватывает площадь около 2.2 млн. кв. км, в пределах 60° – 90° в.д. и 35° – 55° 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 по 36 часов в 1-3 года. 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 НС 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 НС 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 НС РАН с GPS аппаратурой для измерений пока затруднительно. В рамках соглашений об обмене данными наблюдений между НС РАН и Администрацией по землетрясениям СУАР (Китай) в 2015 г данных о GPS измерениях пунктов на территории Китая к нам не поступало.

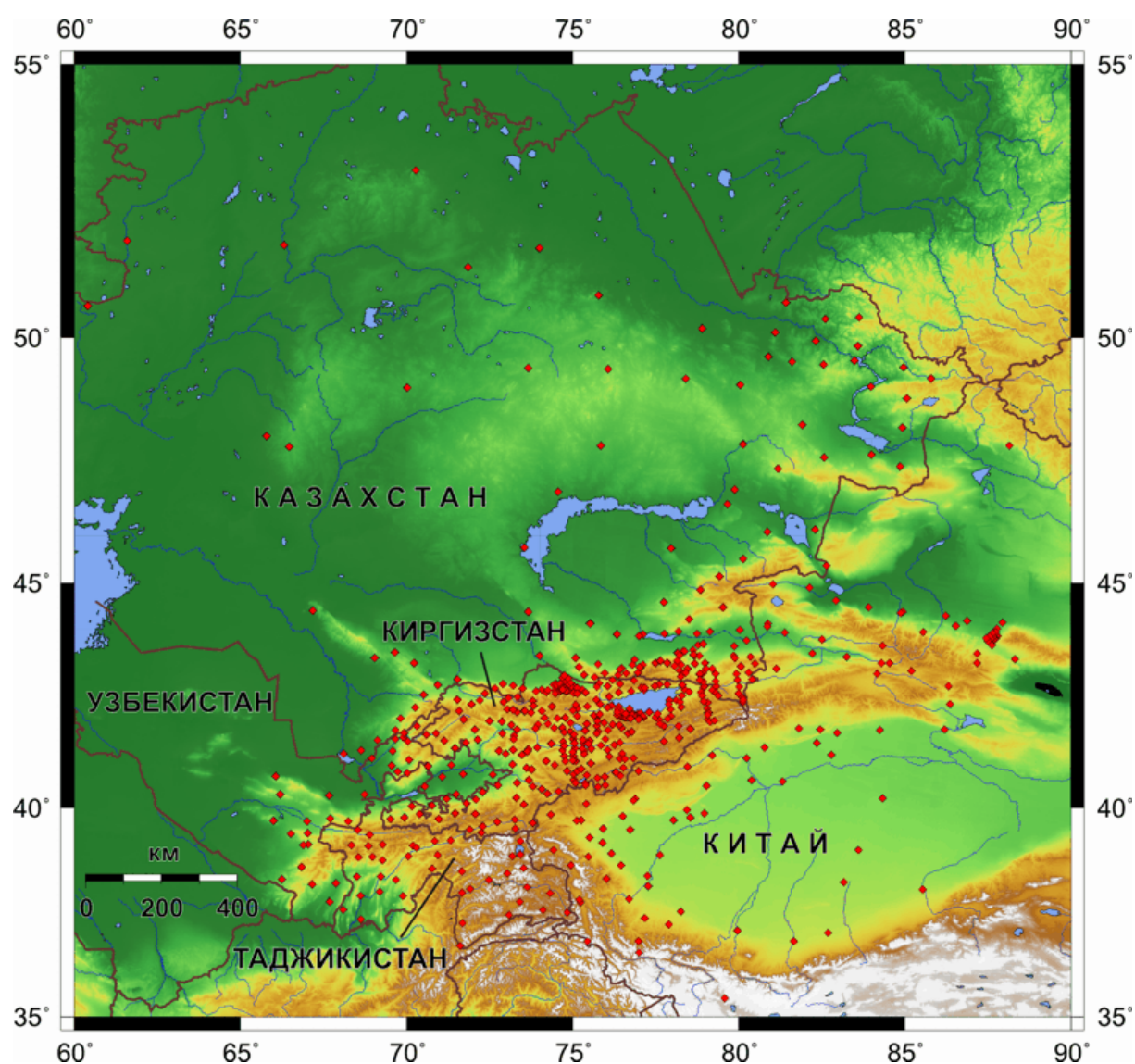


Рисунок 1.1-1 — Центрально-Азиатская GPS сеть, объединяющая 685 пунктов на территории Киргизии (357), Казахстана (176), Таджикистана (43), Узбекистана (35) и Китая (74).

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 ≥ 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 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 НС РАН имеют возможность на каждом из региональных пунктов проводить только один 36-часовой цикл GPS измерений в течение 1-3 лет.

В Центрально-Азиатском 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 1992 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 НС РАН. В 2015 году установка новых региональных GPS пунктов на территории Киргизстана не производилась. Однако на пунктах, подлежащих плановому измерению и у которых осталось по одной рабочей марке, произведена закладка и измерение запасных марок. Как и планировалось, с мая по сентябрь 2015 года, были осуществлены 2 региональные кампании KGS15a и KGS15b по измерению пунктов на территории республики Кыргызстан (рис. 1.2-1).

В измерительных GPS кампаниях 2015 года участвовало как обычно 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 радиии в соответствии с графиком радиосвязи, в районе охвата территории сотовыми операторами – через мобильную связь. Пробег автомобилей в региональных кампаниях 2015 г составил от 1.25 до 3.20, в среднем – 1.94 тысячи километров с расходом ~60 литров бензина на 100 км пробега ЗИЛ-131.

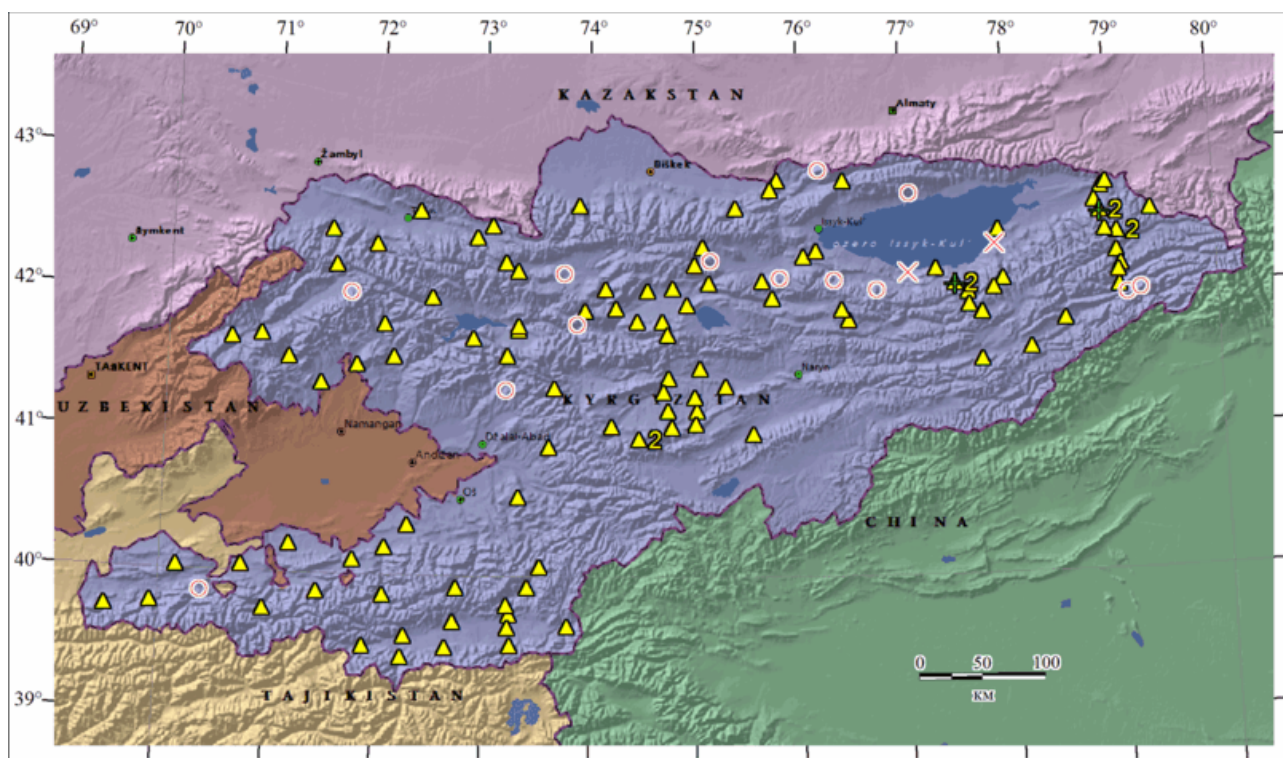


Рисунок 1.2-1 — Положение 106 региональных GPS пунктов (желтые треугольники), измеренных в 2015 г. Желтые числа – количество одновременно измеренных на пункте марок. Зеленые плюсы – пункты, на которых произведена закладка новых марок, зеленые числа – количество новых марок. Красные кружочки – не измеренные GPS пункты, красные крестики – уничтоженные пункты.

С 22 мая по 19 июня 2015 г проходила кампания KGS15a, кампания KGS15b осуществлялась с 05 августа по 02 сентября 2015 г. На эти кампании четырем бригадам было намечен 121 пункт, из которых удалось измерить только 106. На двух пунктах (SSR4, TON4) операторами зафиксировано полное уничтожение всех марок пункта. К 13 пунктам не удалось подъехать, в основном из-за размытых дорог и мостов.

При первой закладке пункта в выбранном месте устанавливается 2-3 марки, 1 основная марка и 1-2 запасных. В 2015 г для восстановления минимального количества рабочих марок на 2 пунктах произведена дополнительная установка по 1 марке американского типа (RTS1 и RTA1). На 4 пунктах кроме основной марки проводились измерения и на 1 дополнительной. Совместное измерение нескольких марок на одном пункте

проводится не более 1-2 раза для фиксации совместного их позиционирования. Если произойдет уничтожение основной марки, то данные совместных измерений позволят безболезненно проводить последующие измерения на одной из запасных марок. Для запасных марок отсутствие хотя бы одного измерения является критичным, практически обесценивающим предназначение запасных марок по технологии регулярных измерений и обработки таких данных.

Все полученные в 2015 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.

1.3 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 НС 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 10 лет чаще всего регулярно 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 с регулярными GPS наблюдениями. Таким образом, разномасштабные объекты наблюдения (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. 1.3-1). 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 конец ноября 2015 г проведено 3 полных цикла измерений, и до конца года будет проведен 4-й цикл измерений локальной GPS сети.

Полученные GPS данные по Бишкекской локальной сети за 2015 г размещены в структурированном архиве, находятся в стадии верификации и подготовки для дальнейшей обработки. Необходимая информация, связанная с новыми данными измерений размещена в базе GPS данных.

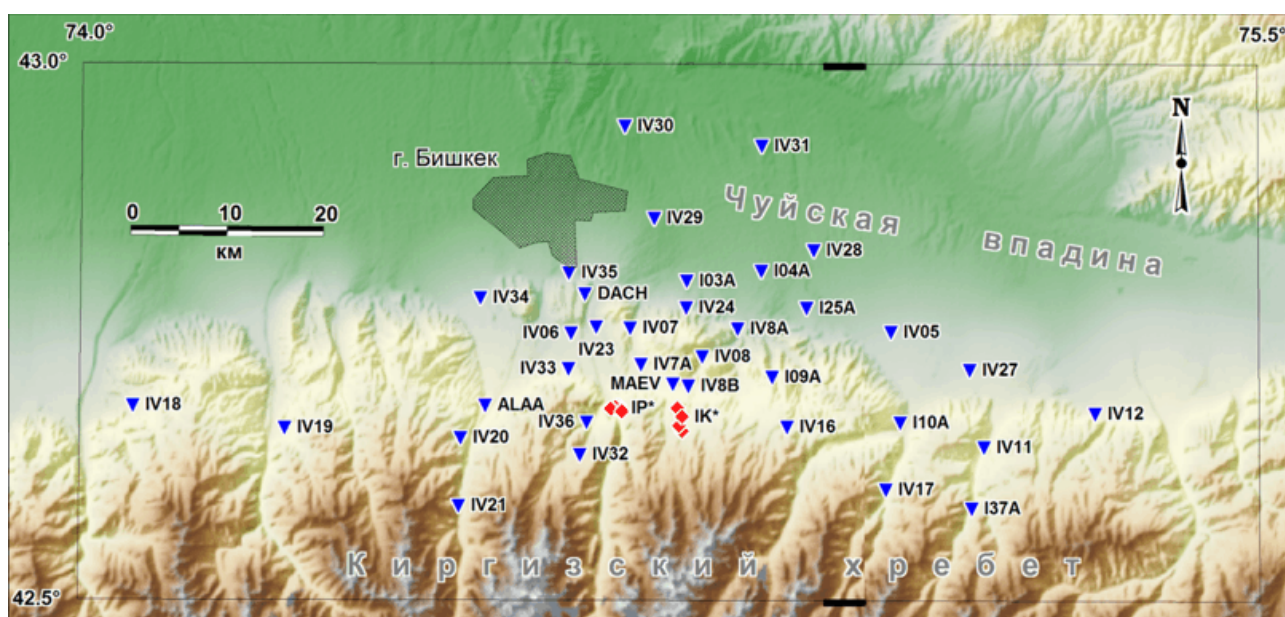


Рисунок 1.3-1 – Положение 36 пунктов (синие треугольники) Бишкекской локальной GPS сети и 10 фундаментальных тумб детальных площадок (красные ромбики) POLIGON (IP**) и KENTOR (IK**).

1.4 Измерения на перманентных станциях Центрально-Азиатской GPS сети.

В 2015 г сотрудники НС РАН продолжили сбор данных с 13 перманентных GPS станций непрерывного наблюдения на территории Центрально-Азиатской сети (Казахстана, Кыргызстана и Таджикистана, рис. 1.4-1). Из них три станции (POL2, SELE-SEL2 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.

С мая 1997 г IGS станция SELE (Казахстан, район ледового катка Медео, ~1342 м н.у.м.) работала достаточно стабильно, без значительных перерывов. В феврале 2013 г со станции были получены последние данные GPS позиционирования. Работа станции SELE была заморожена по причине отсутствия гаранта выполнения работ по обслуживанию станции с Казахский стороны. Только в текущем году усилиями сотрудников НС РАН

организационные вопросы были разрешены, положение станции было смещено в плане ближе к катку Медео на ~5 км и гипсометрически выше. Перманентная станция “Селезашита” с кодом SEL2 начала свою работу с 24 сентября 2015 г.

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.

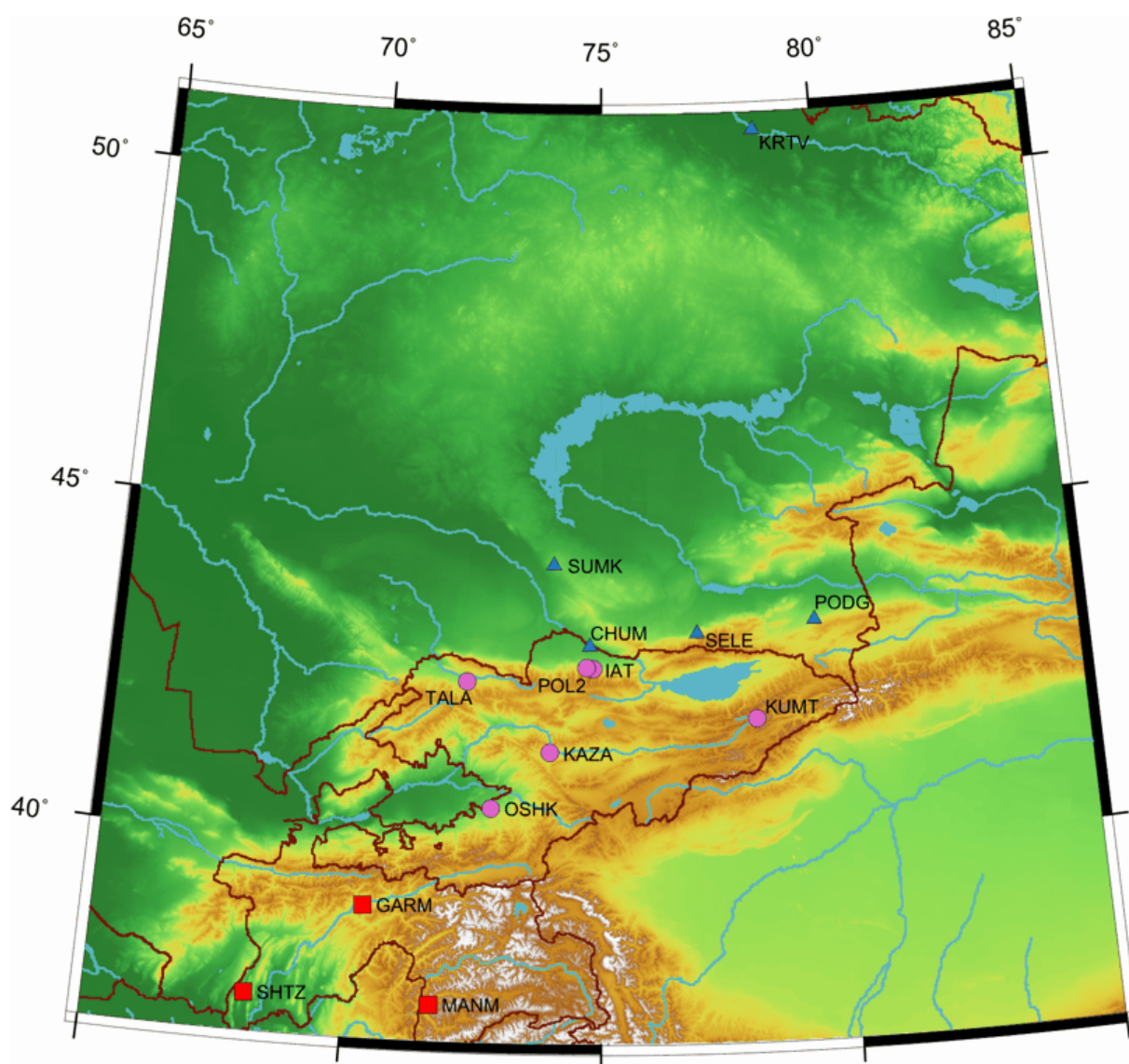


Рисунок 1.4-1— Положение 13 перманентных GPS станций, с которых НС РАН собирает данные в Казахстане (5), Киргизстане (5) и Таджикистане (3). Кроме этого, непрерывному измерению подлежат 4 пункта на детальной площадке ALMALY (IAT)

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. 1.4-1).

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

В текущем году сотрудники ИС РАН проводят уже 24 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 геодинимических 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 необходимо хотя бы кратко обозначить общий порядок обработки данных GPS измерений. На основе данных GPS наблюдений за 1994-2014 гг. представлен вариант расчета векторов скорости для разных пространственных уровней: для всей ЦА GPS сети, для регулярно опрашиваемой территории Киргизского Тянь-Шаня, для Бишкекской локальной сети. В заключительной части главы приводятся результаты анализа сейсмических данных для территории Центрального Тянь-Шаня в пределах 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 90-95 % 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 ИС 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 (CO) и геодезических координат (эллипсоид аппроксимации геоида WGS84) по технологии GLOBK используются синхронные с нашими наблюдениями данные мировых IGS станций CO ITRF-2008. Для уменьшения разброса координат для отдельных пунктов с течением времени используются системы отсчета континентального масштаба, в нашем случае наилучшим образом применима CO 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 2015 г сотрудники лаборатории GPS ИС РАН проводили обработку GPS данных на базе ПК GAMIT/GLOBK 10.4 [Herring et al., 2010a; 2010b; 2010c]. Планируется перевод рабочих мест на версию GAMIT/GLOBK 10.5. В течение 2015 г были обработаны "сырые" GPS данных за 2014 г программой GAMIT. Программой GLOBK рассчитан вариант векторов скорости для Центрально-Азиатской GPS сети в системе отсчета EURA 2008 за 1994-2014 годы наблюдений с интервалом осреднения в 5 дней. Полученные данные GPS измерений за 2015 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 1994-2014 гг. исключены пункты, которые имеют меньше 2-х измерений за весь интервал наблюдений и общую продолжительность измерений менее 1-го года. По результатам обработки текущего года и анализа представлен набор из 580 горизонтальных векторов скорости, сигмы которых не превышают 2 мм/год (рис. 2.2-1). Расчеты осуществлены в системе отсчета EURA-08.

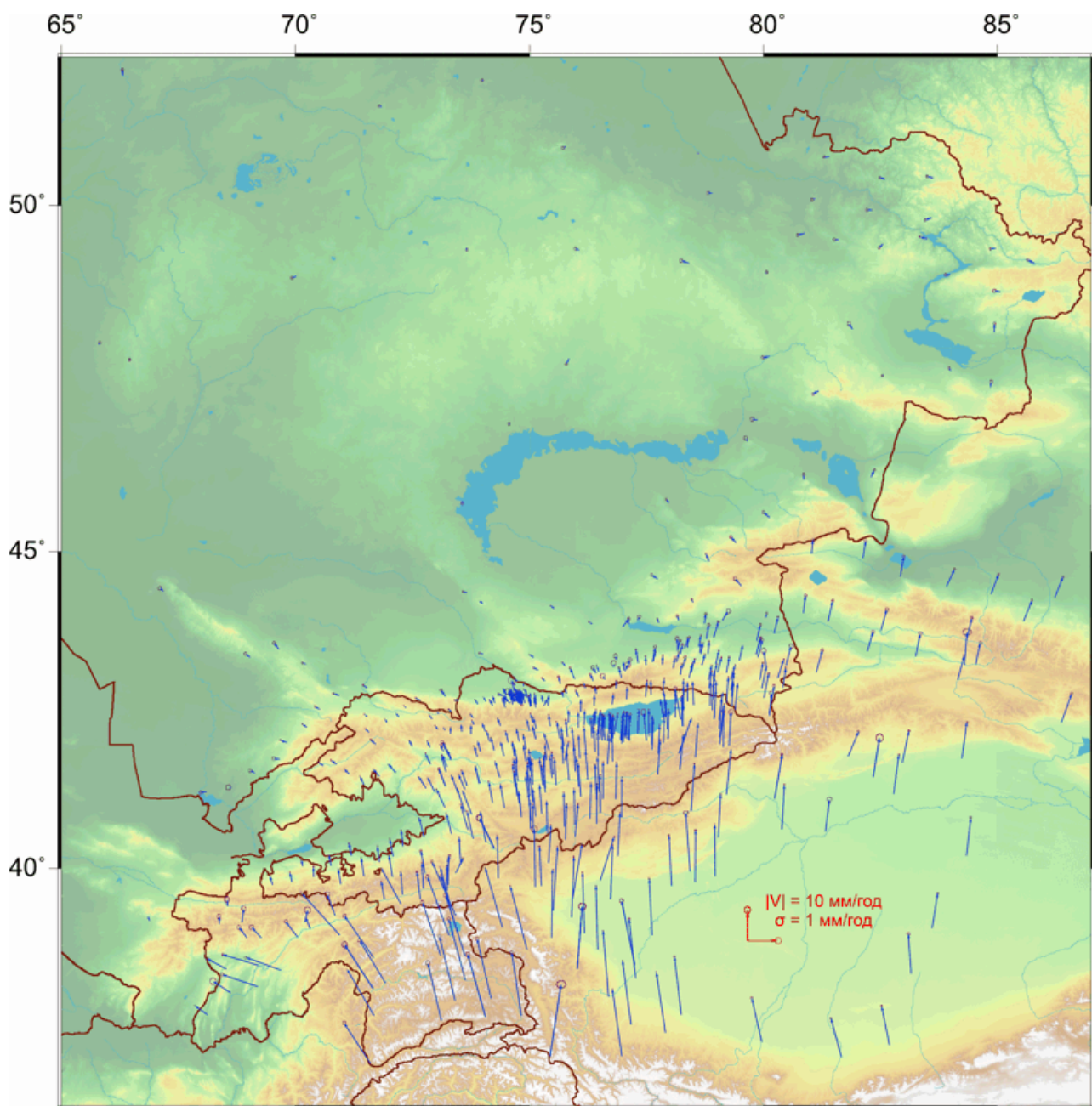


Рисунок 2.2-1 — Горизонтальные векторы скорости ($\sigma_{NE} \leq 2$ мм/год) для 580 региональных, локальных и перманентных пунктов Центрально-Азиатской GPS сети, рассчитанные за 1994-2014 гг. измерений в системе отсчета EURA 2008

После получения данных о векторах скорости из GAMIT/GLOBK векторы скорости прошли несколько процедур фильтрации. На первом этапе были удалены все данные о пунктах, находящиеся за пределами территории исследования $36\div 52^\circ$ с.ш. $\times$ $65\div 87^\circ$ в.д. Исклученные при этом пункты составляли в основном IGS станции, используемые для мировой геодезической привязки и для региональной стабилизации. Далее были отделены пункты, у которых для горизонтальных компонент скорости оценки ошибок $\sigma \geq 2$ мм/год. Во всех 16 случаях повышенные значения σ объясняются наличием только 2-3-х эпизодов измерений. Для оставшихся векторов скорости максимальные оценки ошибок составили по северной компоненте – $\sigma_N \leq 1.45$, по восточной – $\sigma_E \leq 1.75$, по вертикальной – $\sigma_H \leq 7.12$ мм/год. Затем по горизонтальным компонентам скорости отделены 4 пункта, имеющие значения по модулю $V_{NE} \geq 25$ мм/год. Во всех этих случаях мы имеем по 2 эпизода измерений. На следующем этапе удалено 14 векторов, ориентировка и/или длины которых сильно выделяются среди ближайшего окружения. В этих случаях отмечается не только малое количество измерений во временном ряду, но и технические ошибки по объединению GPS данных из разных марок в один ряд. Оставшиеся 580 векторов скорости и отражены на рис. 2.2-1.

Помимо этого, отмечено еще 22 пункта с повышенным модулем вертикальной компоненты скорости $|V_H| \geq 13$ мм/год, но они не удалены из общего списка, т.к. вполне могут быть использованы для дальнейшего анализа в плане. Аномальные вертикальные скорости связаны в большей мере с техническими ошибками указания высоты антенны для данного измерения, также есть случаи смещения данных из разных марок, и встречаются случаи малого числа измерений.

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 пересчётов координат и векторов скорости на основе временных рядов координат, уже рассчитанных в результате единого решения в GAMIT/GLOBK.

В силу сложившихся обстоятельств сотрудники НС РАН не имеют возможности планомерно проводить измерения на GPS пунктах сопредельных с Киргизией государств, исключая единичные перманентные станции. Поэтому на сегодняшний день наиболее продолжительные и полные ряды GPS наблюдений имеют региональные пункты по территории Киргизстана (рис. 2.2-2).

По сравнению с региональной GPS сетью Киргизского Тянь-Шаня более детальной является локальная сеть, которая опрашивается уже с 1997 г, в основном 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 – 2014 гг.

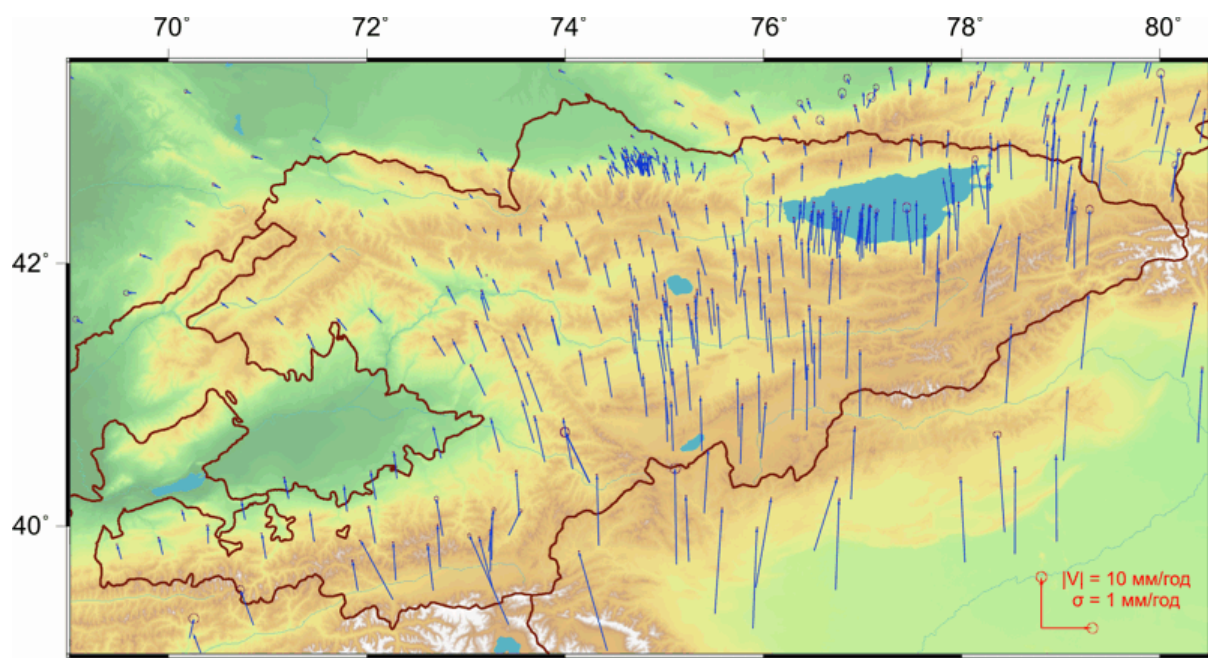


Рисунок 2.2-2 — Векторы скорости Киргизского Тянь-Шаня, рассчитанные в EURA 2008 за 1994-2014 гг. измерений. Оценки горизонтальных ошибок – < 2 мм/год.

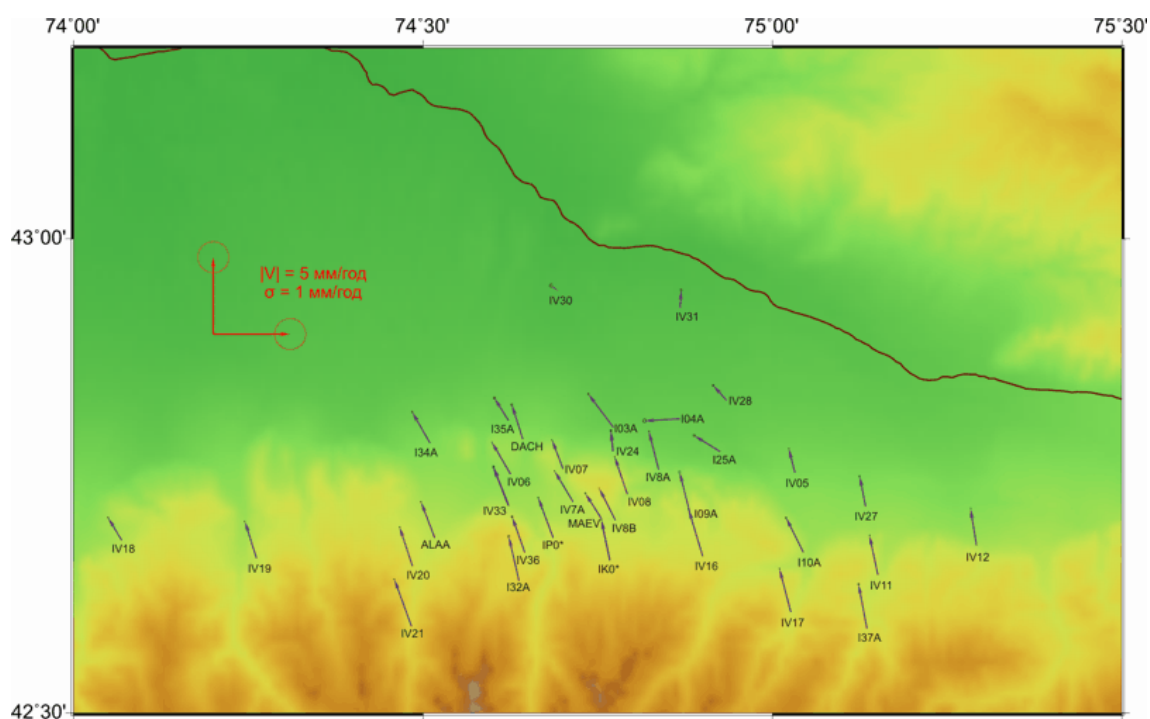


Рисунок 2.2-3 — Горизонтальные векторы скорости движения 36 пунктов Бишкекской локальной GPS сети, и усредненные векторы для детальных площадок KENTOR (IK0*, 4 пункта) и POLIGON (IP0*, 6 пунктов) в системе отсчета EURA 2008 за 1997 – 2014 гг.

2.3 Фокальные механизмы очагов и сейсмотектонические деформации Северного Тянь-Шаня по данным сети KNET за 1994-2014 гг.

Фокальный механизм – тектонофизическая модель очага землетрясения, построенная на основании инструментальных данных сейсмических записей. Характеризует в трехмерном виде поле напряжений в районе очага (ориентировку осей напряжений) и положение нодальных плоскостей смещения по разрыву. Подавляющий объем накопленной в современной сейсмологии экспериментальной информации по механизмам очагов землетрясений получен на основе данных по полярности вступлений сейсмических волн. И в настоящее время в условиях оснащенности все большего числа сейсмических станций цифровой аппаратурой этот источник продолжает оставаться важнейшим.

Расчет фокальных механизмов очагов землетрясений (ФМО) в ИС РАН начался с 2001 г. Каталог ФМО содержит решения по событиям, которые произошли на территории расположения станций сети KNET, начиная с 1994 года. С середины 1998 года сеть KNET начала работать в режиме реального времени, что позволило повысить качество работы сети. В связи с этим большую часть каталога фокальных механизмов составляют события, которые произошли после 1998 года. Каждый год каталог пополняется новыми решениями. К настоящему моменту каталог содержит более 1220 решений ФМО, из них 66 событий за 2014 год. Результаты ранних исследования ФМО представлены в работах [Сычева и др., 2005; Сычева, Юнга, 2011]. Для исследования напряженно-деформированного состояния земной коры применяется метод сейсмотектонических деформаций. В основе этого метода лежат данные о фокальных механизмах. Целью данной работы является анализ каталога ФМО за 1994-2014 гг. и расчет сейсмотектонических деформаций на его основе.

2.3.1 Расчет фокальных механизмов очагов

Одним из условий надежного определения фокального механизма сейсмического события является полное окружение эпицентра пунктами наблюдений. Поэтому в качестве исследуемой территории была выбрана область, ограниченная координатами расположения крайних станций сети: 42.0° - 43.0° СШ и $73^{\circ}.75$ - 76.0° ВД, и покрывающая площадь 100×300 км². Если полный каталог на данный момент содержит более 8500 событий, то только 2880 событий попадают на территорию, ограниченную координатами крайних станций сети. Однако не для всех этих событий стало возможным определение механизма очага. Для событий за 1994-1998 годы практически невозможно восстановить записи волновых форм с магнитных лент, для событий за 1999-2014 годы фокальные механизмы получены только частично из-за ограничений условий работы алгоритма.

Для расчета фокального механизма использовалась программа FPFIT [Reasenber, Oppenheimer, 1985; Snoke, 1990; 1989; 1984], которая находит решения для двойной пары плоскостей разрыва (исходная модель), которые наилучшим образом удовлетворяют данному множеству зарегистрированных значений первых вступлений землетрясения. Обратное преобразование (инверсия) достигается посредством двух стадийного поиска по сетке, который обеспечивает приведение минимизированной модели источника, взвешенной суммы разниц полярности первого вступления. Два весовых коэффициента комбинированы при минимизации: один отображает оцениваемое изменение данных, а другой базируется на абсолютном значении теоретического значения амплитуды излучения Р-волн.

Расчет фокальных механизмов очагов проводился на компьютере SUN под операционной системой Solaris 2.8. В качестве входных данных программа FPFIT использует выходной ARC-файл (файл архива фаз) программы HYPOCENTER (программа расчета параметров гипоцентра) и файл управления, позволяющий настраивать значения параметров расчета, например, количество зарегистрированных фаз. По умолчанию FPFIT позволяет получать решения фокальных механизмов, если события зарегистрированы пятью и более станциями ($OBS=5$, observation - наблюдение). Количество OBS можно задавать в файле управления FPFIT.INP. Исходя из условий сети KNET, максимально OBS может принимать значение 10, при регистрации события всеми станциями сети, поэтому для получения более надежных решений минимальное значение OBS ограничено 7 станциями. В качестве выходных данных программа рассчитывает параметры, характеризующие положение плоскости разрыва в пространстве: угол простирания (STRIKE), угол падения (DIP) и угол скольжения (RAKE), или сжатие, которое было зафиксировано по каждой фазе.

Программы FPFIT и FOCMEC позволяют рассчитывать параметры, характеризующие положение плоскости разрыва в пространстве: угол простирания (STRIKE), угол падения (DIP) и угол скольжения (RAKE). В работе [Сычева, 2005] для >700 решений фокальных механизмов разброс в определении положения нодальных плоскостей составляет по каждому из этих углов соответственно 11°, 19° и 19 градусов. При рассмотрении событий, для которых решения были получены по 9-10 станциям, этот разброс составил 9°, 17° и 17°. Эти результаты показали, что увеличение числа станций уменьшает ошибки в определении параметров плоскости разрыва.

В результате обработки получены механизмы очагов 1220 землетрясений, которые в основном произошли после 1998 года, общее число событий на этой территории за этот же период составляет 2200 событий. Отсутствие решений для оставшейся части событий связано либо с недостаточностью регистрирующих станций (слабые события), либо с трудностью определения знака прихода Р-волны на некоторых станциях, что так же

приводило к ограничению по OBS. При наличии нескольких решений по механизму очага, был использован лишь первый вариант, рекомендуемый программой FPFIT как предпочтительный. В результате, в каталог вошли 1220 сейсмических событий. На рис. 2.3.1-1 представлено расположение всех событий каталога по данным сети KNET (серый цвет) и событий на территории, ограниченной координатами краевых станций сети (желтый цвет).

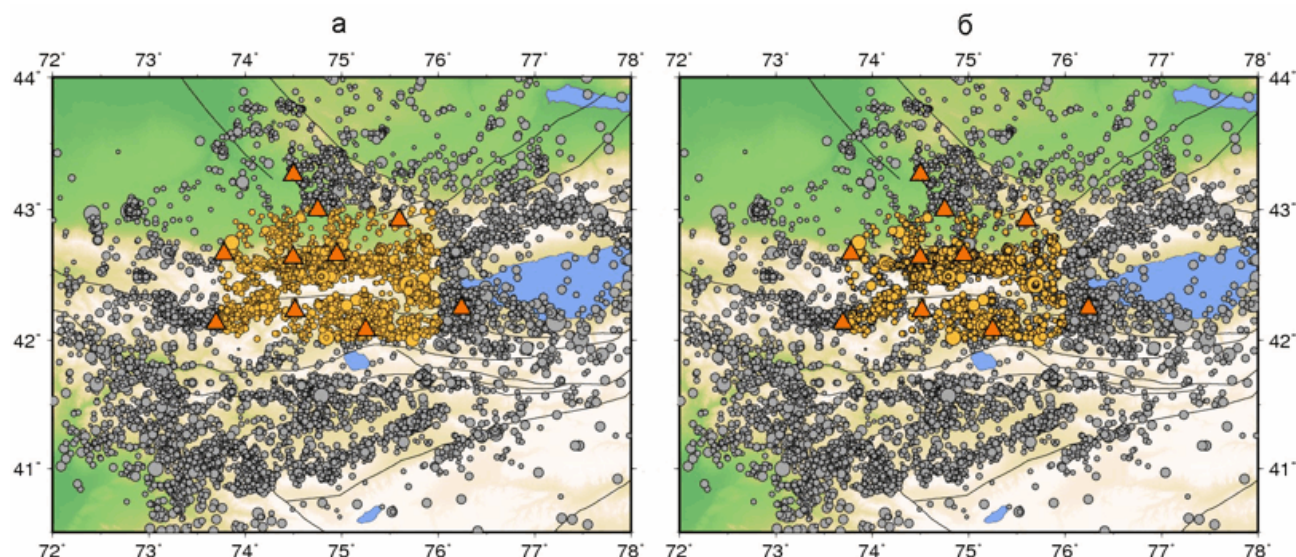


Рисунок 2.3.1-1. Эпицентральное расположение землетрясений (желтый кружочки) в области, ограниченной координатами краевых станций сети *KNET* на фоне локальной сейсмичности (серые кружочки): а – все события (2200); б – для которых получены решения фокальных механизмов (1200).

На рис. 2.3.1-1а включены все землетрясения, на рис. 2.3.1-1б только события с рассчитанными механизмами очагов, что составляет 55% от всего числа рассматриваемых событий. Как видно из рисунка, события, для которых были получены решения фокальных механизмов, повторяют рисунок общего числа событий, исключая первоначальную плотность. Это обстоятельство позволяет относить полученные результаты ко всей исследуемой территории.

Некоторые статистические характеристики каталога фокальных механизмов представлены на рис. 2.3.1-2: основную часть составляют слабые события ($M=1.5-2.0$), которые произошли с 1999 по 2014 год. Глубина расположения основной части событий - 5-15 км и половина решений получены по 9-10 знакам (OBS).

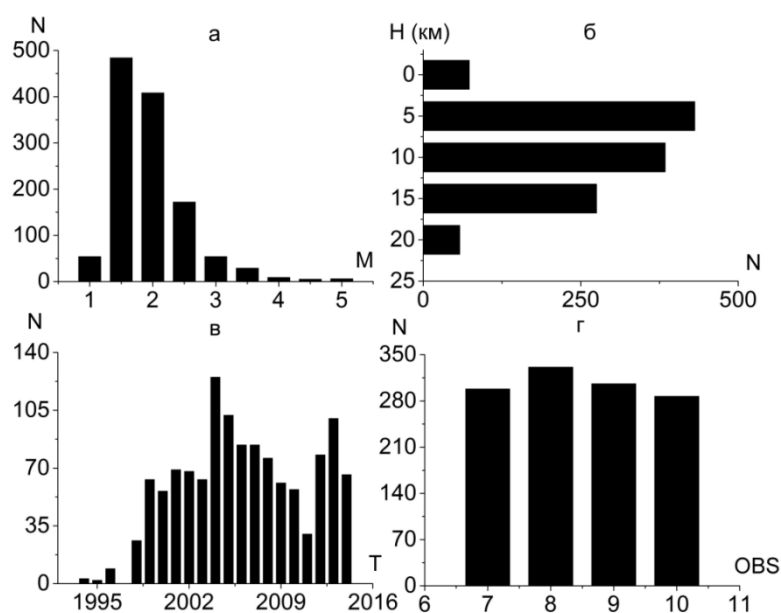


Рисунок 2.3.1-2 — Некоторые характеристики каталога фокальных механизмов очагов (1220 событий): а - распределение по магнитудам; б - распределение по глубине; в - распределение по времени; г - по *OBS* (количество знаков).

На рис. 2.3.1-3 представлены фокальные механизмы землетрясений, полученные по данным сети KNET и местоположение станций сети.

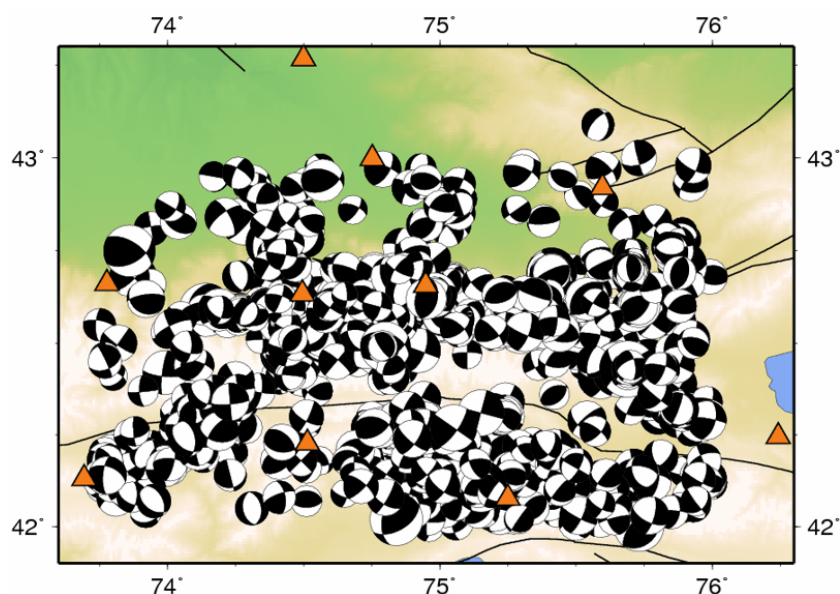


Рисунок 2.3.1-3 — Фокальные механизмы очагов землетрясений по данным сети KNET, треугольниками обозначено местоположение станций сети.

Как известно, надежную оценку фокального механизма удастся получить при наличии широкого окружения сейсмическими станциями очага землетрясения в регионе с хорошо изученным скоростным разрезом и четкими импульсными вступлениями. Более реальной является ситуация, когда плотность станций сравнительно низка, скоростная структура

известна только приблизительно, а определение полярности первых вступлений не по всем станциям однозначно. В такой ситуации почти всегда можно получить несколько вариантов решений по фокальным механизмам, не противоречащих полученным наблюдениям. В работе [Сычева, Богомолов, 2014] было проведено сравнение решений фокальных механизмов очагов, полученные по знаку прихода Р-волны на станцию, с решениями из других источников (метод волновой инверсии и решения из каталога СМТ - centroid moment tensor). В результате было установлено, что полученные фокальные механизмы в целом хорошо согласуются с решениями из других источников, некоторые различия можно объяснить недостаточностью количества знаков (7-9 станций).

В работе [Юдахин, 1983] отмечено, что подавляющее большинство очагов землетрясений Тянь-Шаньского региона распространяется до глубин 5-15 км, реже встречаются очаги с глубиной 16-20 км и еще реже 25 км. Очаги с глубиной до 30 км наблюдаются очень редко, т.е. землетрясения Тянь-Шаня являются коровыми и их очаги располагаются в верхней части земной коры, а точнее в домезозойском основании.

Эпицентральное положение механизмов очагов на глубинах 0-5 км, 5-10 км, 10-15 км, 15-20 км и более 20 км представлено на рис. 2.3.1-4. Для каждой рассматриваемой глубины количество землетрясений составляет 74, 430, 385, 275 и 58 событий, что соответствует 6%, 35%, 31.5%, 22.5% и 3.5% от общего числа событий. Число событий в сейсмоактивном слое 5-15 км [Юдахин, 1983], составляет 67% событий от общего числа событий.

На глубине 0-5 км основную часть событий составляют афтершоки Суусамырского землетрясения (19.08.1992, $M=7.3$) и расположены в районе Суусамырской впадины. Несколько событий расположено в центральной части Киргизского хребта, и вдоль Иссык-атинского разлома. Остальные события произошли в районе Кочкорской впадины.

На глубине 5-10 км прослеживаются две непрерывные зоны сейсмической активности, которые расположены субширотно, первая зона начинается с области сочленения Кугей и Терской Алатау и распространяется по северному склону Киргизского хребта с востока на запад. В центральной части Киргизского хребта эта зона расширяется как на юг, так и на север в районе Чуйской впадины. Вторая зона находится к югу от Киргизского хребта и начинается от западной части Терской Алатау и проходит вдоль южного края Кочкорской впадины, гор Кара-кетты, хребта Джумгал-тоо и продолжение этой зоны проходит по юго-восточной стороне Суусамырской впадины.

На глубине 10-15 км прослеживается компактно-расположенная сейсмичность в отдельных зонах предыдущего рисунка. На глубине 15-20 км область сейсмичности расширяется включением сейсмичности в районе гор Жетижол и Чуйской впадины. На

глубине более 20 км сейсмичность расположена в отдельных зонах вдоль Иссык-Атинского разлома, гор Жетижол. Несколько землетрясений расположено южнее Киргизского хребта.

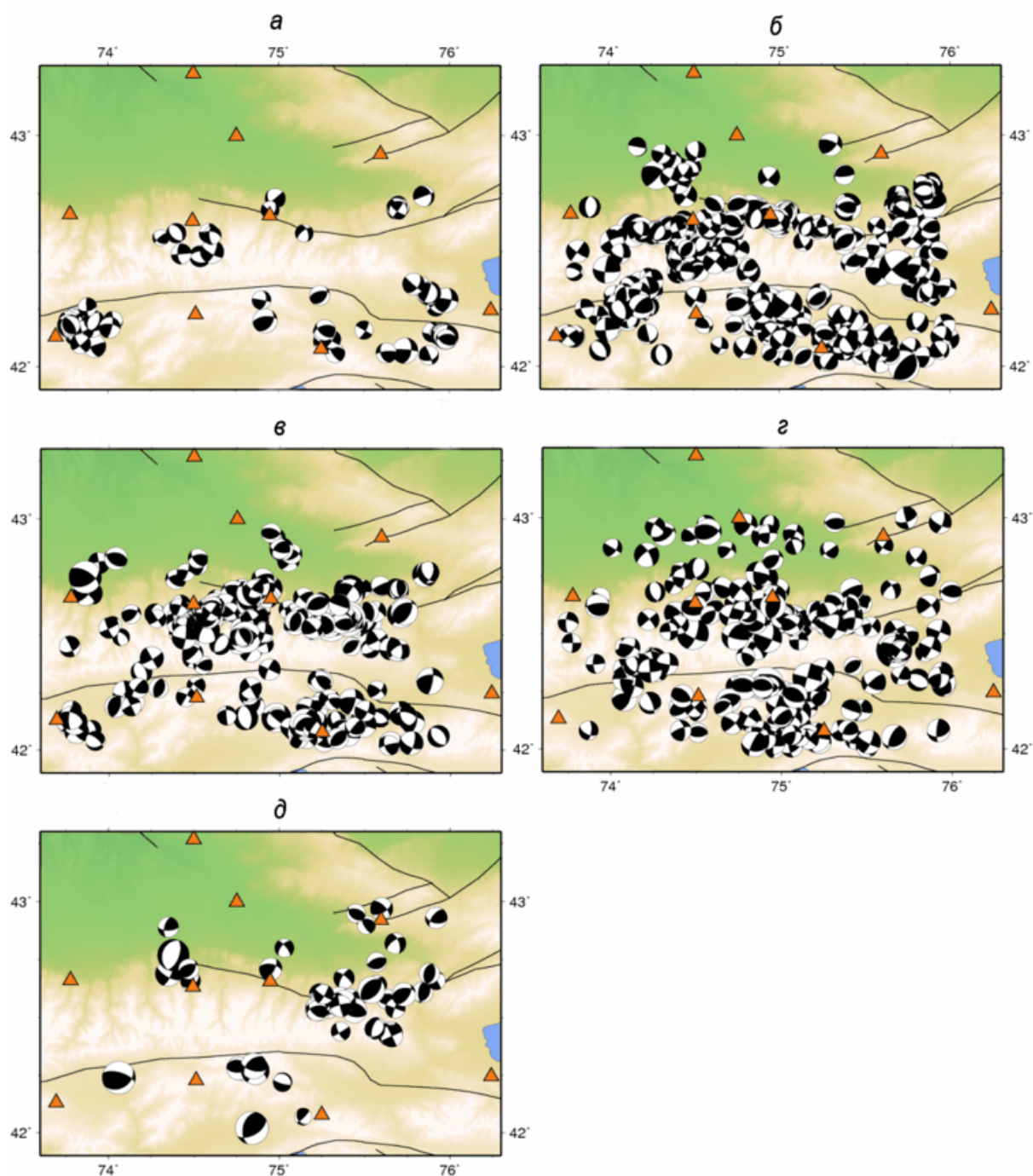


Рисунок 2.3.1-4 — Механизмы землетрясений для различных глубин: *а* – 0-5 км; *б* – 5-10 км; *в* – 10-15 км; *г* – 15-20 км; *д* – 20-25 км.

2.3.2 Анализ фокальных механизмов очагов

В работе [Юнга, 1990] было отмечено, что глубинные разломы Тянь-Шаня являются крутопадающими взбросами. Именно это в совокупности с параллельностью большинства глубинных разломов и их z-ориентированностью, а также субширотной вытянутостью и

параллельностью между собой крупных структурных элементов Тянь-Шаня позволило исследователям высказать предположение, что современный структурный план Тянь-Шаня формировался в условиях горизонтального субмеридионального сжатия.

Ранее в работе [Крестников и др., 1987] было отмечено, что для всего региона Северного Тянь-Шаня в целом характерно большое разнообразие механизмов очагов землетрясений, однако преобладающими являются три разновидности механизмов. В первом из них ось сжатия горизонтальна и ориентирована в северо-восточном направлении, а ось растяжения субвертикальна, и этот тип очагов характеризуется взбросовыми движениями при равновероятных плоскостях разрывов, простирающихся в субширотном и субмеридиональном направлении. Второму типу свойственно поле, при котором ось растяжения горизонтальна и ориентирована в северо-восточном направлении, а ось сжатия круто наклонена на юго-восток, что свидетельствует о сбросо-сдвиговом характере движений при равновероятных плоскостях разрывов, ориентированных так же, как и в первом случае. Для третьего типа механизмов характерно то, что обе оси субгоризонтальны, но ось сжатия ориентирована в северо-западном направлении, а растяжения – в северо-восточном, что указывает на сдвиговые движения в очагах. При этом плоскости равновероятных разрывов ориентированы так же, как и в очагах первых двух. Обобщенный же механизм очагов землетрясений, указывающий на наиболее общие особенности современного регионального поля напряжений, характеризуется тем, что ось сжатия ориентирована в северо-западном направлении, а ось растяжения субвертикальна при взбросовых движениях в очаге. При этом плоскости равновероятных разрывов также ориентированы в субмеридиональном и субширотном направлениях.

Исследованию деформационных процессов земной коры Тянь-Шаня на основе механизмов очагов посвящены работы [Беленович, Багманова, 1993; Беленович, Багманова 1988; Кальметьева и др., 2003; Лопатина, Серебрянская, 1978; Лопатина 1975], в которых результаты получены на основе изучения либо сильных землетрясений, либо незначительного количества землетрясений средней силы, описан тип деформации. Авторы этих работ так же отмечают механизмы, имеющие взбросовый и сдвиговый характер, и выделяют северо-западное направление оси сжатия. Как было отмечено выше, основную часть событий рассматриваемого каталога составляют многочисленные слабые события. Согласно рис. 2.3.1-3 на исследуемой территории проявляются следующие типы механизмов: взбросы, взбросо-сдвиги, сдвиги и сбросы.

Решения фокальных механизмов связаны с определением параметров нодальных плоскостей (потенциальные плоскости разрыва) и осей главных напряжений, которые характеризуются углом погружения и направлением азимута. На рис. 2.3.2-1 представлены

некоторые статистические характеристики параметров осей сжатия и растяжения. При построении диаграмм значения углов простираения усреднялись в окне с шагом 5° , а при построении графика распределения углов погружения с шагом 10° . Согласно полученным результатам основная часть осей сжатия имеет направление, которое меняется от северо-северо-западного до северного и даже северо-северо-восточного, а осей растяжения от северо-восточного до юго-восточного. Максимальный разброс азимутов осей сжатия ограничен сектором 330° - 10° , а осей растяжения 60° - 120° . Это хорошо согласуется с ранее опубликованными результатами [Юнга, 1990, Курсеев, 2004; Крестников и др., 1987]. Анализ количественной характеристики значений угла погружения для осей сжатия и растяжения, который может меняться от 0° до 90° относительно горизонтальной плоскости, показал, что 75 % осей сжатия и 53% осей растяжения имеют угол до 30° (рис. 2.3.2-1б).

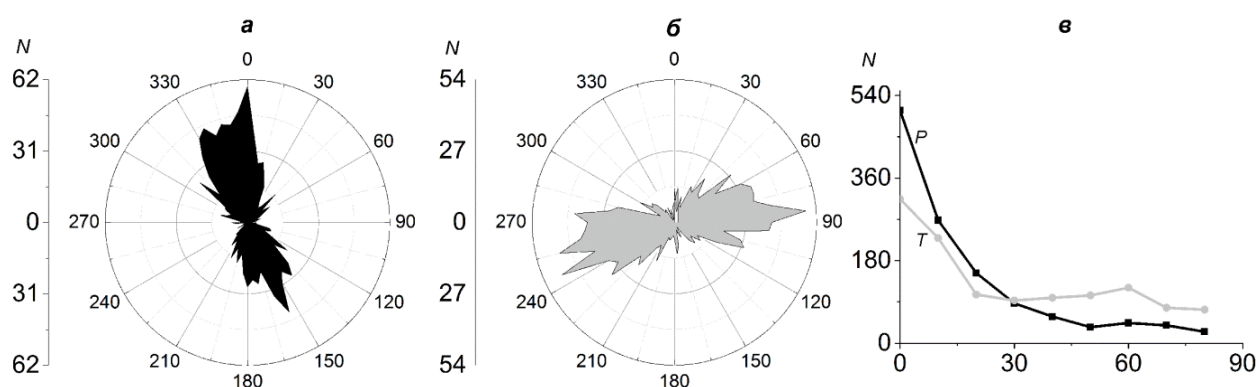


Рисунок 2.3.2-1 — Диаграммы распределения осей сжатия (а), растяжения (б) и распределение углов погружения этих осей (в).

В работе [Юдахин и Беленович, 1989] отмечено, что, обладая различными реологическими свойствами, слои земной коры Тянь-Шаня по-разному реагируют на испытываемое ими тектоническое сжатие. И было логичным исследовать изменение азимутов главных осей и углов погружения в зависимости от глубины расположения очагов сейсмических событий. На рис. 2.3.2-2 (а-г) представлены диаграммы распределения осей сжатия, растяжения и зависимости числа этих осей от угла погружения, построенные для различных диапазонов глубин с пересечением (0-10 км, 5-15 км, 10-20 км и 15-25 км).

Как видно из рисунка направление оси сжатия на всех рассматриваемых глубинах меняется в секторе 330° - 360° , однако пиковое значение числа событий с глубиной смещается от 330° (северо-западное направление) к 360° (северное). Направления осей растяжения для всех глубин меняются от северо-восточного до юго-восточного. На этом же рисунке представлена зависимость числа Р и Т осей от угла наклона.

Как меняется процентное соотношение числа осей с углом наклона до 30° с глубиной представлено в таблице 2.3.2.1. В таблице прослеживается увеличения числа осей сжатия и уменьшение числа осей растяжения с углом погружения до 30° в зависимости от глубины.

Как известно, от положения осей главных напряжений, которые характеризуются углом погружения (plunge) и направлением оси, определяется тип очага. По определению, взбросами являются события, ось сжатия которых субгоризонтальна, при этом ось растяжения вертикальна, и наоборот, сбросами являются события, ось растяжения которых субгоризонтальна, а ось сжатия субвертикальна.

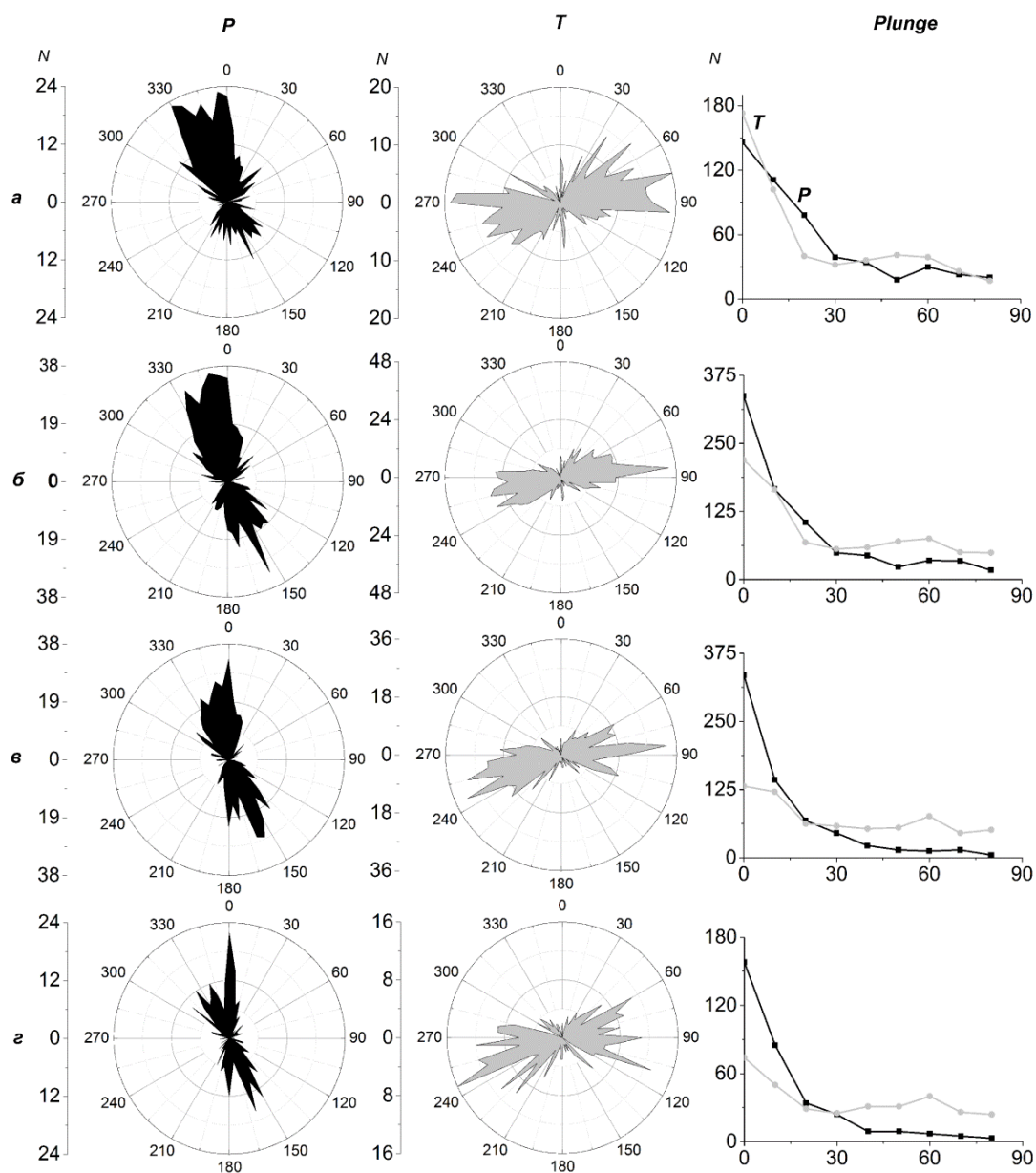


Рисунок 2.3.2-2 — Диаграммы распределения азимутов осей сжатия, растяжения и распределение угла погружения этих осей для выборок по разным глубинам: а - (0-10) км; б - (5-15) км; в-(10-20) км; г- (15-25) км.

Таблица 2.3.2.1 — Процентное соотношения числа P , T осей с углом наклона меньше 30° .

H , км	0-10	5-15	10-20	15-25
P ось	67%	75%	82%	82%
T ось	62%	55%	48%	46%

Из всего числа событий были выделены те для которых угол погружения оси P меньше 30° , а угол погружения оси T выше 60° градусов. Эти события отнесены к событиям взбросового типа (259 событий 21% от общего числа событий). Эпицентральное положение этих событий представлено на рис. 2.3.2-3 а. Так же были выделены события, для которых угол погружения оси растяжения меньше 30° , а угол погружения оси сжатия больше 60° . Эти события отнесены к событиям сбросового типа и эпицентральное положение этих событий представлено на рис. 2.3.2-3 б (111 событий - 9% от общего числа событий). Согласно рис. 2.3.2-3 а расположение событий взбросового типа сконцентрировано в трех зонах, ориентированных субширотно: в районе Чуйской впадины; вдоль Иссык-атинского разлома и южнее Киргизского хребта. События сбросового типа большей частью расположены в компактных областях западной части исследуемой территории, и отдельными событиями представлены в ее восточной части.

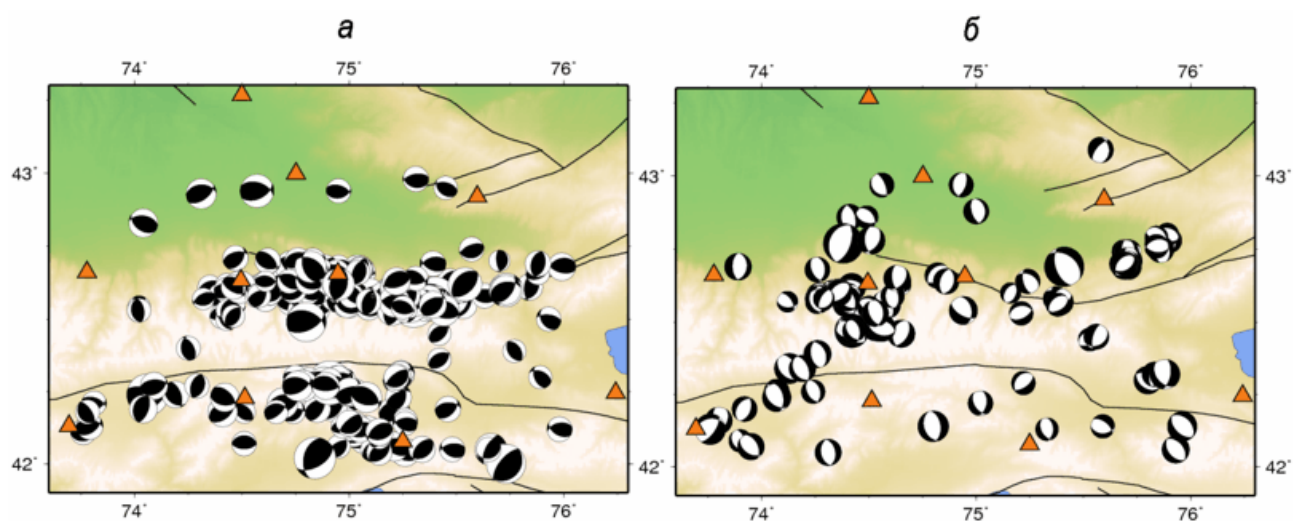


Рисунок 2.3.2-3 — Эпицентральное положение механизмов типа: a - взбросы; b – сбросы.

При исследовании трещиноватости горных пород в частности в работе [Крестников и др., 1987] отмечается, что наряду со сходством простираний главных систем трещин в горных породах и разрывов в очагах землетрясений отмечаются различия в углах падения их плоскостей. Так, если трещины в горных породах преимущественно субвертикальны, то равновероятные плоскости в очагах подавляющего большинства землетрясений характеризуются достаточно пологим падением около $40^\circ - 50^\circ$.

Поперечные «анти Тянь-Шаньские» структурные элементы, выявляемые традиционными геологическими и геофизическими методами, достаточно хорошо известны на Тянь-Шане и Памире. Наиболее крупные и активные из них - это зоны Таласо-Ферганского и Памиро-Алайского глубинных разломов. То, что эти структурные направления фиксируются и в трещиноватости пород практически всех возрастов, и в механизмах очагов землетрясений, позволяет утверждать, что они имеют «сквозное» развитие с древнейших этапов геологической истории до наших дней. В то же время резкая активизация сейсмических процессов в конце четвертичного периода свидетельствует об интенсификации тектонических процессов, связанных с этими направлениями и, таким образом, можно говорить о происходящей перестройке новейшего структурного плана рассматриваемой территории. В качестве косвенного подтверждения происходящего процесса перестройки можно рассматривать параллельное существование очагов землетрясений, как с субвертикальной, так и с субгоризонтальной осями сжатия, т.е. характеризующиеся и сбросовыми и взбросовыми движениями, причем плоскости сместителей простираются в близких направлениях.

2.3.3 Расчет сейсмотектонических деформаций Северного Тянь-Шаня

В основу исследования легли фокальные механизмы очагов 1220 землетрясений, которые произошли внутри территории, ограниченной координатами краевых станций сети KNET за 1994-2014 годы. Решения механизмов очагов получены на основе знаков прихода Р-волн и собраны в каталог фокальных механизмов. Характеристики этого каталога были описаны выше. Методика расчета сейсмотектонических деформаций подробно изложена в работе [Сычева и др., 2005] и здесь не приводится.

Разбиение территории на элементарные ячейки. Ранее в работах [Сычева и др., 2005; Сычева и Юнга, 2011] в качестве элементарных ячеек рассматривались круговые области с центром в узловых точках, в качестве которых принимались координаты 23-х пунктов региональной GPS-сети. Согласно карте расположения землетрясений (рис. 2.3.3-1), для которых определены фокальные механизмы, положение GPS пунктов (красные треугольники) не всегда попадают в область сейсмической активности, поэтому в данной работе выбор узловых точек осуществлялся в местах концентрации землетрясений (зеленые точки). Такой подход в выборе узловых точек позволил несколько расширить территорию исследования и в пределах ячеек осреднения иметь достаточно представительное число определений механизмов землетрясений.

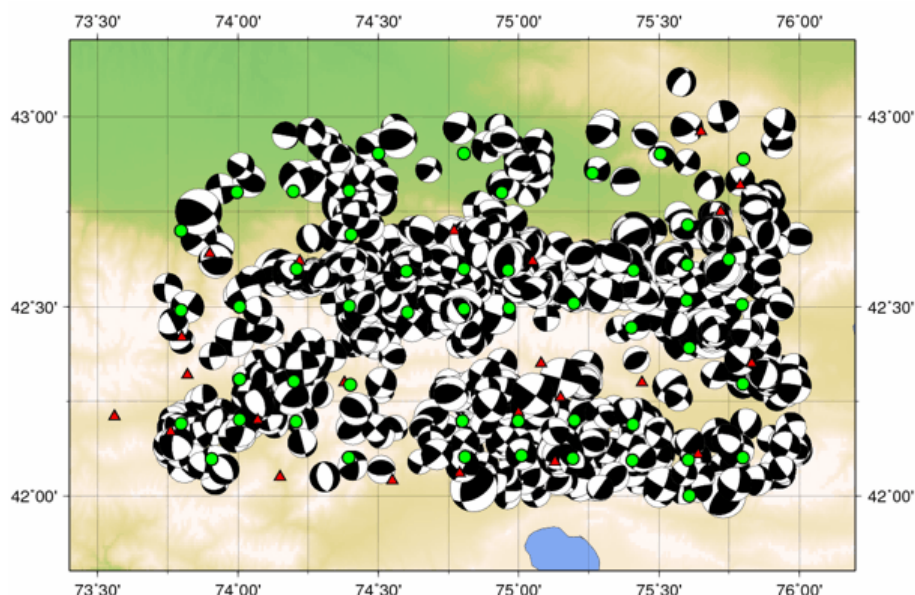


Рисунок 2.3.3-1 — Фокальные механизмы очагов, пункты *GPS* наблюдений (треугольники) и узловые точки (кружочки).

В работах Юнга С.Л. предлагается рассматривать элементарные подобласти с размером порядка 1 дугового градуса, что соответствует расстоянию ~ 100 км. Этот размер можно соотнести с зоной подготовки крупного сейсмического события. На рис. 2.3.3-2 представлены карты СТД, построенные для различных значений радиуса R от 0.1° до 0.5° с шагом 0.1° . Выбор малого радиуса для элементарной ячейки позволяет увидеть более детальную деформационную картину, а увеличение радиуса ведет к сглаживающему эффекту на общую деформационную картину. Наиболее устойчивый результат, когда режимы СТД мало меняются от величины радиуса, наблюдается с $R \geq 0.3^\circ$. Небольшая площадь исследуемой территории $\sim 100 \times 300$ км оправдывает выбор радиуса элементарной ячейки $R = 0.35^\circ$ при расчете СТД.

В работе [Юнга, 1990] отмечено, что при расчёте средневзвешенного среднего механизма очага предпочтительнее использовать весовую функцию для территории исследования. Для территории Северного Тянь-Шаня такая функция ранее была получена в работе [Сычева, 2005] на основе немногочисленных данных. Получение весовой функции на основе расширенных данных по фокальным механизмам позволит уточнить ранее полученную зависимость.

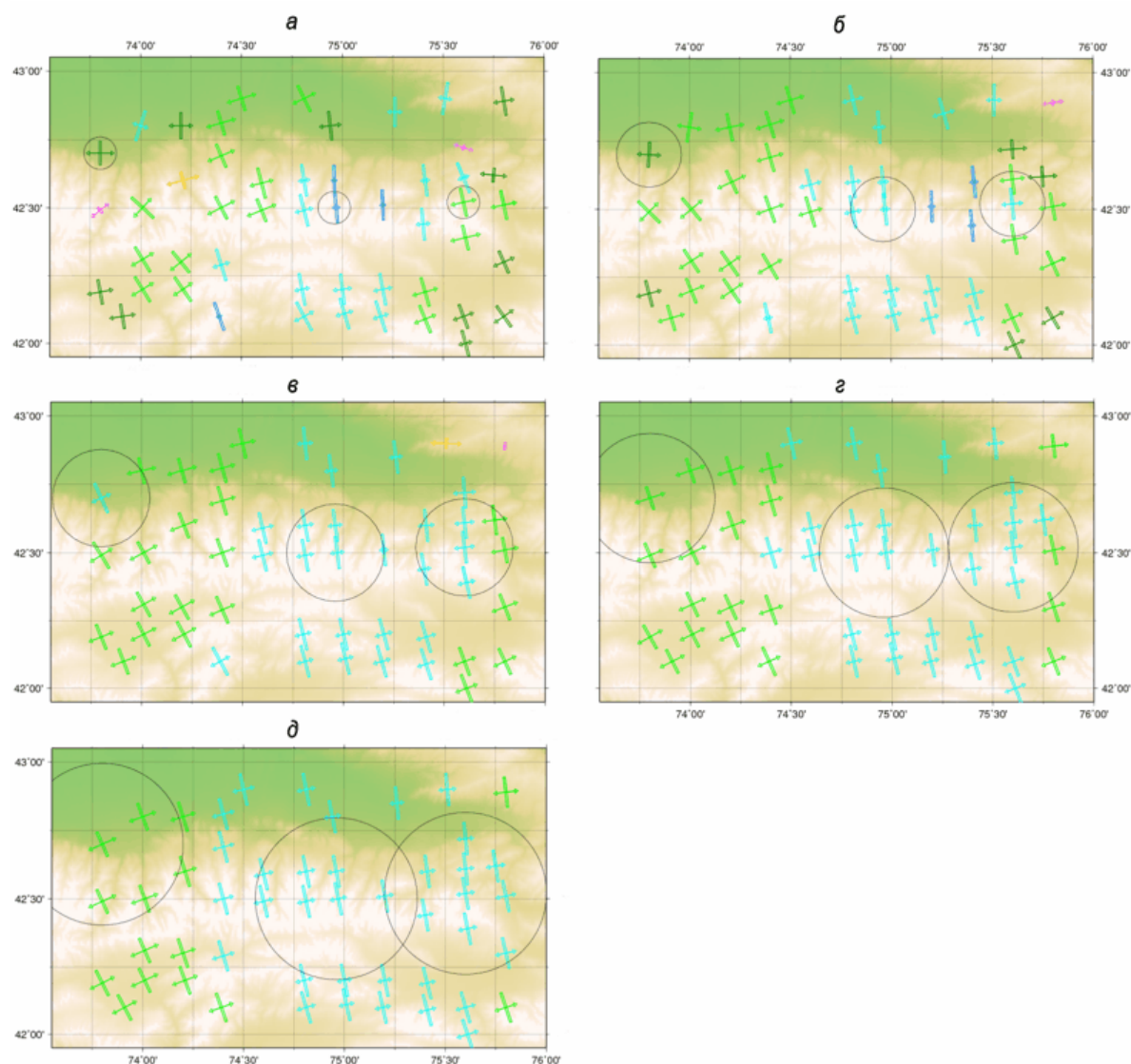


Рисунок 2.3.3-2 — Влияние радиуса исследуемого объема на расчет СТД: а – $R=0.1^\circ$; б – $R=0.2^\circ$; в – $R=0.3^\circ$; г – $R=0.4^\circ$; д – $R=0.5^\circ$.

Согласно графику повторяемости землетрясений (рис. 2.3.3-3), представительной является выборка событий с $7 \leq K \leq 11$, согласно эмпирической зависимости класса и магнитуды из работы [Ризниченко, 1985] это соответствует событиям $1.6 \leq M \leq 3.8$, которые и были рассмотрены в дальнейшем для расчета зависимости K_m от магнитуды.

Расположение узловых точек, которые являются центрами элементарных ячеек, выбиралось в местах концентрации сейсмических событий, и в расчете средней матрицы участвовали все события, которые попадали в область с радиусом $0,5$ градусов вокруг узловой точки. По каждой узловой точке рассчитывалась интенсивность результирующей матрицы K , которая далее сравнивалась с критическим значением K [Юнга, 1990], чтобы убедиться в не случайности результатов расчетов. И для каждой узловой точки значение интенсивности было больше значения K - критического, что свидетельствует о представительности выборки. Результаты расчета коэффициентов соответствия по каждому

событию были сгруппированы по магнитудным интервалам, и для каждого интервала рассчитано среднее значение K_M . Результирующая зависимость K_M от магнитуды, представленная на рис. 2.3.3-4, носит почти линейный характер. Аппроксимация этой кривой линейной зависимостью позволила определить точку ее пересечения с осью M ($M_c = -1,58$).

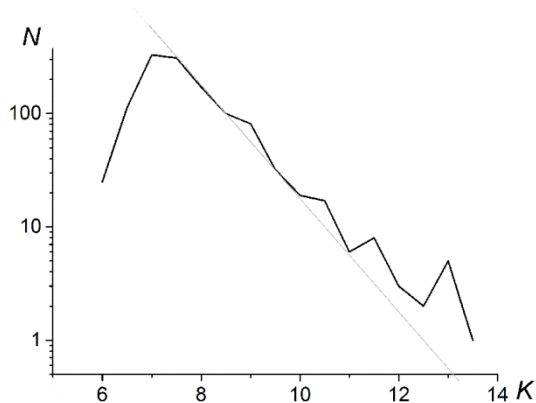


Рисунок 2.3.3-3 — График повторяемости событий каталога фокальных механизмов за 1994-2014 гг.

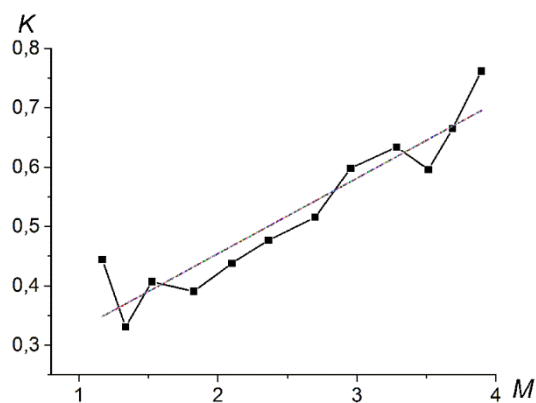


Рисунок 2.3.3-4 — График зависимости параметра K_M от магнитуды M .

В формуле вычисления весового коэффициента необходимо знать $M_{\max}$, которая может быть определена из исследуемого каталога, но для нашего случая (данные сети KNET) в качестве $M_{\max}$ была принята магнитуда Суусамырского землетрясения (19.08.1992, $M=7,3$). В результате чего функция вычисления весового коэффициента приняла вид: $w=(M+1,58)/(7,3+1,58)=0,11 \cdot (M+1,58)$. Таким образом, согласно этой формуле, события с магнитудой $M=-1,58$ имеют нулевой вес, и при $M=7,3$ вес принимает значение, равное единице. Полученная весовая функция может быть использована на данном этапе работы и, по мере поступления новых данных по фокальным механизмам, может уточняться. Ранее весовая функция была определена на основе данных 870 землетрясений, которые произошли за 1994-2004 гг. и весовая функция соответствовала выражению $w=(M-0,5)/(7,3-0,5)=0,147 \cdot (M-0,5)$ [Сычева, 2005].

Для исследования этого вопроса расчет СТД проводился по трем весовым функциям: в первом случае рассматривалась весовая функция, полученная Юнга С.Л. на основе анализа мировых данных [Юнга, 1990]; во втором использовалась весовая функция, полученная в работе [Сычева, 2005] и в третьем - весовая функция, полученная выше. Карты СТД, полученные по трем весовым функциям, практически не отличаются друг от друга (рис. 2.3.3-5), за исключением нескольких узловых точек, что позволяет сделать вывод, об устойчивости расчета СТД. Для дальнейших расчетов использовалась региональная весовая функция вида: $w=0,11 \cdot (M+1,58)$.

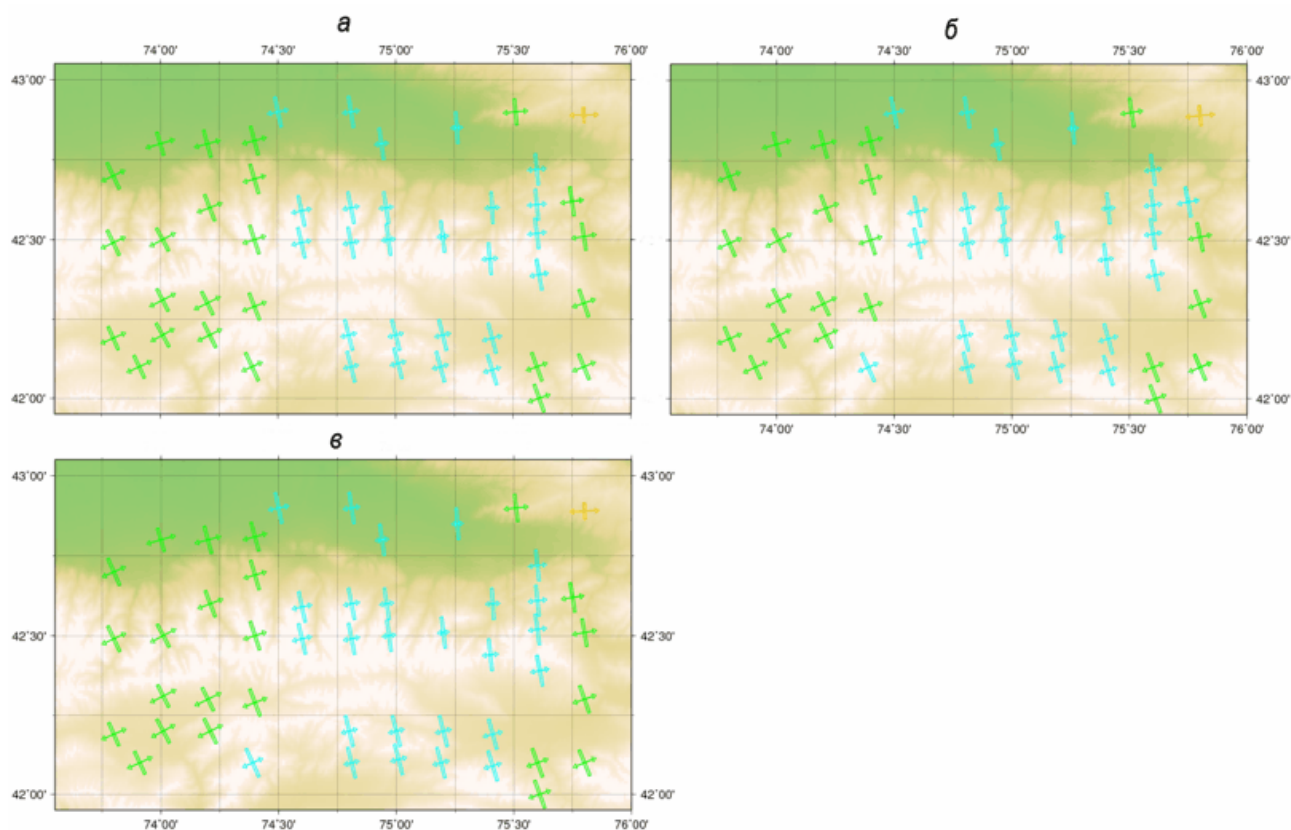


Рисунок 2.3.3-5 — Влияние весового коэффициента на расчет STD: а - Юнга, по мировым данным; б – Сычева, по данным KNET за 1994-2003 гг; в – Сычева, по данным KNET за 1994-2014 гг.

В таблице 2.3.3.1 представлены координаты узловых точек, количество событий и значение горизонтальных и вертикальных компонент усредненного тензора деформации, определенного для каждой узловой точки, где расчет проводился по объему с радиусом $R=0.35^\circ$ и толщина исследуемого слоя 30 км, согласно [Юдахин, 1987] землетрясения Северного Тянь-Шаня располагаются не ниже 30 км.

Таблица 2.3.3.1 — Координаты узловых точек, количество событий и значение компонент усредненного тензора деформации.

φ°	λ°	N	ZZ	ZY	ZX	YY	YX	XX
42.70	73.80	39	0.09191	0.02752	-0.09064	-0.51569	0.51385	0.42378
42.49	73.80	93	0.03473	-0.12311	0.05093	-0.46151	0.53299	0.42678
42.19	73.80	98	-0.03942	-0.18542	0.12947	-0.43749	0.48853	0.47691
42.10	73.91	98	-0.05623	-0.18368	0.15099	-0.40350	0.50478	0.45972
42.80	74.00	84	-0.14706	-0.04132	-0.04709	-0.51183	0.37041	0.65890
42.20	74.01	126	0.00957	-0.16140	0.09777	-0.38125	0.56798	0.37168
42.31	74.01	167	-0.09963	-0.11240	0.08970	-0.35700	0.55352	0.45662
42.50	74.01	198	-0.08229	-0.08733	0.01506	-0.35403	0.57525	0.43631
42.80	74.20	172	0.02596	-0.10017	-0.03808	-0.61629	0.35217	0.59033
42.30	74.20	234	-0.09042	-0.07210	0.02062	-0.37988	0.55456	0.47030
42.20	74.21	153	0.02005	-0.10902	0.07273	-0.43061	0.55284	0.41056
42.60	74.21	311	0.02656	-0.08573	0.01913	-0.53816	0.46504	0.51160

Продолжение таблицы 2.3.3.1

42.10	74.39	108	0.21637	-0.06512	-0.04109	-0.55497	0.50926	0.33860
42.50	74.40	395	0.14817	-0.07499	0.00764	-0.63332	0.40633	0.48515
42.81	74.40	299	0.11792	-0.07024	0.01046	-0.66115	0.34913	0.54323
42.29	74.40	294	0.08056	-0.07576	-0.01195	-0.55965	0.46851	0.47909
42.69	74.40	384	0.17274	-0.05346	-0.00850	-0.66865	0.36830	0.49591
42.90	74.50	228	0.24210	-0.07965	0.01893	-0.73437	0.27051	0.49227
42.59	74.60	473	0.27120	-0.07599	-0.00267	-0.74034	0.27081	0.46914
42.49	74.60	504	0.28386	-0.08377	0.00277	-0.73249	0.28946	0.44862
42.20	74.80	237	0.38653	-0.06271	-0.03986	-0.74028	0.28843	0.35375
42.49	74.81	548	0.39059	-0.07038	0.02343	-0.76660	0.23171	0.37601
42.60	74.81	547	0.38594	-0.06713	0.00558	-0.76784	0.23082	0.38190
42.90	74.81	276	0.36959	-0.08985	0.01131	-0.77834	0.19250	0.40875
42.10	74.81	193	0.40511	-0.09396	-0.03319	-0.73782	0.28368	0.33271
42.80	74.94	387	0.45279	-0.06894	0.01924	-0.78625	0.16637	0.33346
42.60	74.96	521	0.44038	-0.06327	-0.00333	-0.78602	0.17427	0.34564
42.50	74.97	559	0.45500	-0.06648	0.00425	-0.79004	0.15442	0.33504
42.20	75.00	255	0.39369	-0.07673	-0.00130	-0.73613	0.29503	0.34244
42.11	75.01	233	0.39184	-0.07889	0.00373	-0.73355	0.29927	0.34171
42.10	75.19	236	0.36789	-0.10846	0.04177	-0.72187	0.30923	0.35398
42.51	75.20	442	0.50284	-0.04001	-0.01449	-0.79110	0.13151	0.28827
42.20	75.20	272	0.38044	-0.10196	0.02483	-0.73478	0.28964	0.35434
42.85	75.26	278	0.50107	-0.04240	-0.03315	-0.80044	0.08001	0.29937
42.44	75.40	369	0.39935	-0.06016	-0.02525	-0.79992	0.12586	0.40057
42.09	75.41	187	0.32929	-0.13126	0.03030	-0.68737	0.35677	0.35808
42.19	75.41	232	0.27751	-0.11707	0.02994	-0.70472	0.32760	0.42721
42.60	75.41	340	0.43890	-0.06484	-0.02208	-0.80601	0.08233	0.36712
42.90	75.51	145	0.08151	-0.08087	-0.22355	-0.68601	0.14882	0.60450
42.52	75.60	303	0.32202	-0.08606	-0.12256	-0.77025	0.16919	0.44824
42.61	75.60	285	0.31251	-0.07950	-0.09961	-0.78213	0.13710	0.46961
42.72	75.60	273	0.32500	-0.08473	-0.09792	-0.78292	0.13819	0.45791
42.10	75.60	188	0.19045	-0.13656	0.06892	-0.60735	0.43258	0.41690
42.00	75.61	117	0.15589	-0.14682	0.10066	-0.59419	0.42845	0.43831
42.39	75.61	304	0.31170	-0.12295	-0.04050	-0.75111	0.23674	0.43941
42.51	75.80	216	0.08784	-0.14324	-0.13076	-0.68049	0.22665	0.59266
42.30	75.80	156	0.11007	-0.16216	0.03242	-0.58580	0.42645	0.47572
42.10	75.80	128	0.07328	-0.19360	0.06980	-0.51210	0.47703	0.43882
42.89	75.80	103	-0.32427	-0.21607	-0.18903	-0.41741	0.05333	0.74168
42.62	75.75	234	0.17607	-0.10561	-0.12163	-0.72673	0.20705	0.55066

Согласно таблице 2.3.3.1 значения горизонтальной компоненты YY (рис. 2.3.3-6 б) отрицательные, а горизонтальной компоненты XX (рис. 2.3.3-6 г) – положительные, что означает сокращение исследуемой территории в направлении север–юг и растяжение в направлении запад–восток. Максимальное сокращение по компоненте YY характерно для территории Киргизского хребта восточнее 74.30°ВД и Джумгал-Тоо, а максимальное растяжение для юго-западной части озера Иссык-Куль и западной части Чуйской впадины. Вертикальная компонента (ZZ) за исключение нескольких точек имеет положительное

значение, что указывает в целом на вздымание исследуемой территории. Отрицательные значения вертикальной компоненты для узловых точек расположенных в Суусамырской впадине и западной части Чуйской впадины и могут означать опускание этих территорий (рис. 2.3.3-6а). По распределениям компонент усредненного тензора деформации представленных на рис. 2.3.3-6 в целом можно отметить зоны максимальных и минимальных значений, однако картирование компонент не позволяет представить деформационный режим в целом, и требуется их одновременное рассмотрение, что не удобно для использования специалистами других областей - геодезии, геофизики и геологии.

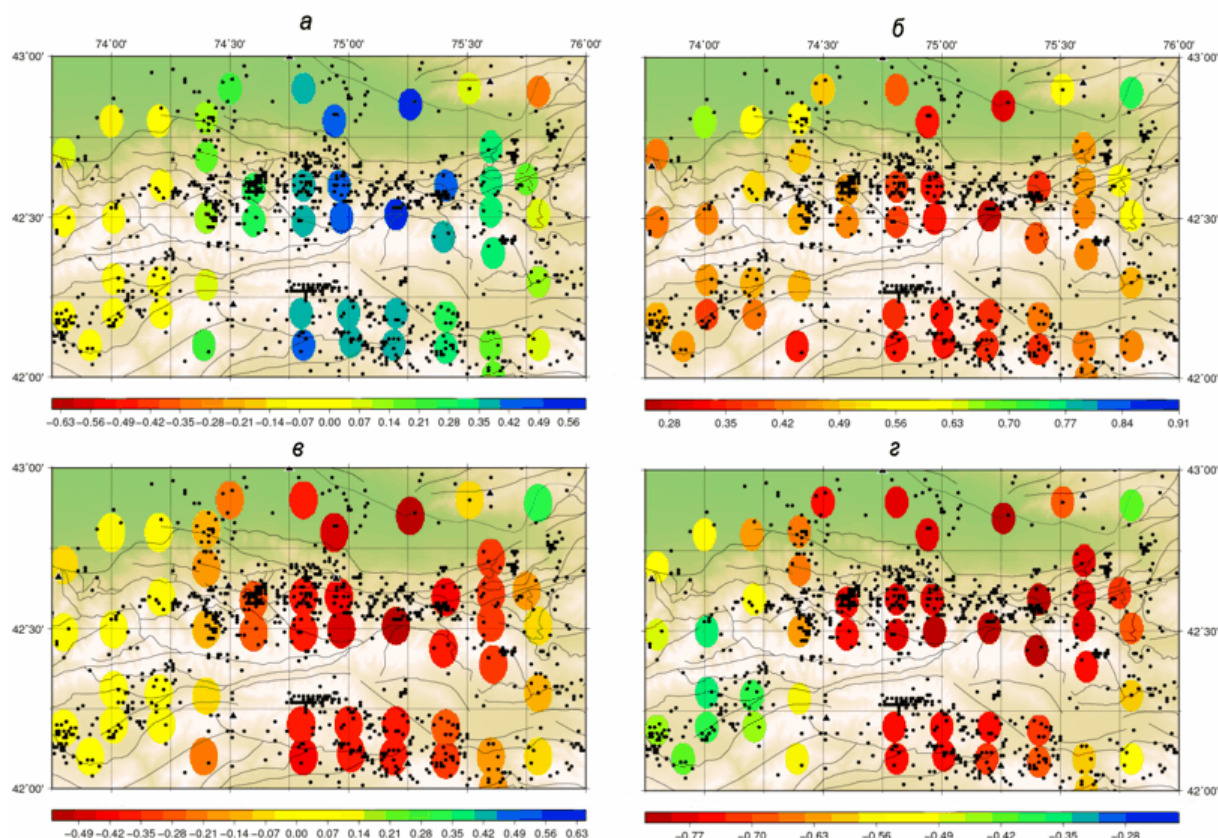


Рисунок 2.3.3-6 — Распределение компонент тензора деформации: а – ZZ; б – YY; в – (XX+YY); г – XX, черными точками отмечено эпицентральное положение исследуемых событий.

На рис. 2.3.3-7 представлена карта *СТД*, построенная на основе классификации режимов *СТД*. Режим *СТД* обозначается значком, представляющим геометрические фигуры: прямоугольник с перпендикулярными к нему стрелками из его центра. Направление прямоугольника и стрелок на горизонтальной поверхности позволяет судить соответственно об азимутальном направлении осей сжатия и растяжения (нулевое направление - на север). Длина прямоугольника и стрелочек является отражением проекции осей сжатия и растяжения, которая зависит от угла их наклона к горизонтальной плоскости, а цвет фигуры определяет режим деформации.

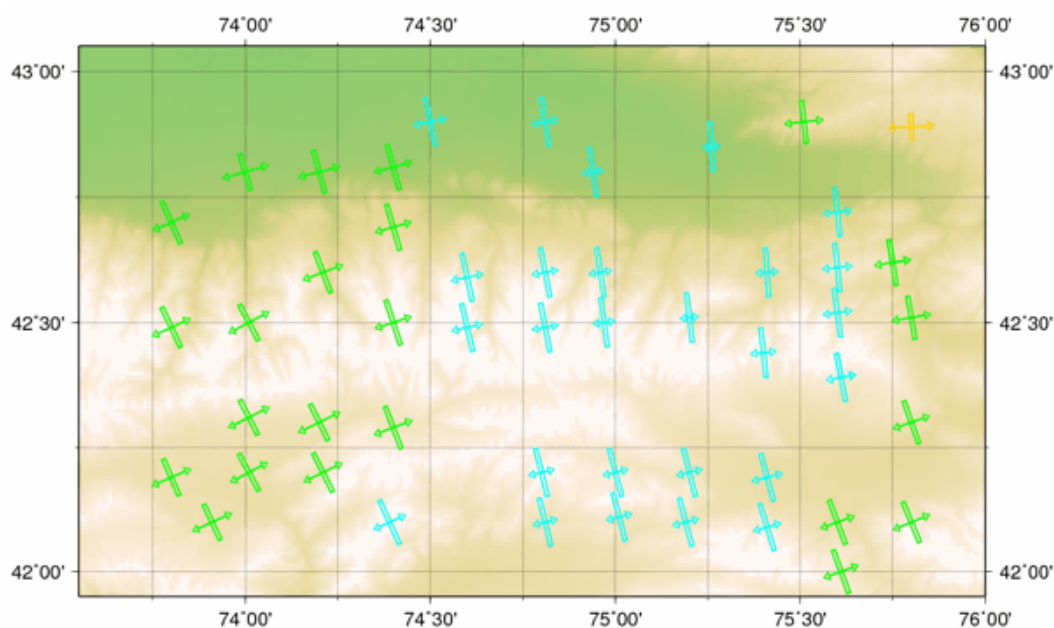


Рисунок 2.3.3-7 — Карта сеймотектонических деформаций.

Согласно схеме классификации для исследуемой территории характерно два режима деформации: горизонтальный сдвиг (зеленый цвет) и режим транспрессии (бирюзовый). Первый режим проявляется в западной части исследуемой территории (Суусамырская впадина и западная часть Киргизского хребта и Чуйской впадины) и в крайней восточной субмеридионально расположенной полосе (юго-восточная часть Кочкорской впадины и восточная концевая часть Киргизского хребта). Режимом транспрессии характеризуются деформации восточной части Киргизского хребта, Суусамыр-Тоо и Джумгал Тоо. Направление осей сжатия разворачивается от С-СЗ в западной части, к субмеридианальному – в восточной области. Аналогичные результаты были получены на основе исследования 800 землетрясений в работе [Сычева и др., 2005].

При построении карт СТД для различных глубин весь исследуемый слой был поделен на 4 перекрывающихся диапазона глубин: 0-10 км, 5-15 км, 10-20 км и 15-25 км и каждый из полученных результатов соответственно можно привязать к глубинам 5, 10 15 и 20 км (рис. 2.3.3-8). На глубине 5 км (рис. 2.3.3-8а) отмечается разнообразие режимов СТД: режим растяжения, переходный режим от растяжения к сдвигу, горизонтальный сдвиг, транспрессия и переходный режим от сжатия к сдвигу. В западную область, которая характеризуется режимом горизонтального сдвига по рис. 2.3.3-7, попадают локальные зоны с переходным режимом от растяжения к сдвигу. Область транспрессии, которая расположена восточнее 74.30°ВД по рис. 2.3.3-7, имеет меньшие размеры, а с восточной стороны появляется субмеридионально расположенная зона с режимом горизонтального сдвига, переходным режимом от сжатия к сдвигу и даже есть несколько локальных зон с режимом растяжения. Многообразие режимов деформации на этой глубине можно объяснить

раздробленностью и блочным строением приповерхностного слоя земной коры. При рассмотрении режимов СТД на других глубинах можно отметить следующую тенденцию: с увеличением глубины уменьшается количество деформационных режимов, расширяется территория, которая характеризуется режимом транспрессии и происходит разворот направления осей сжатия от северо-северо-западного к северному.

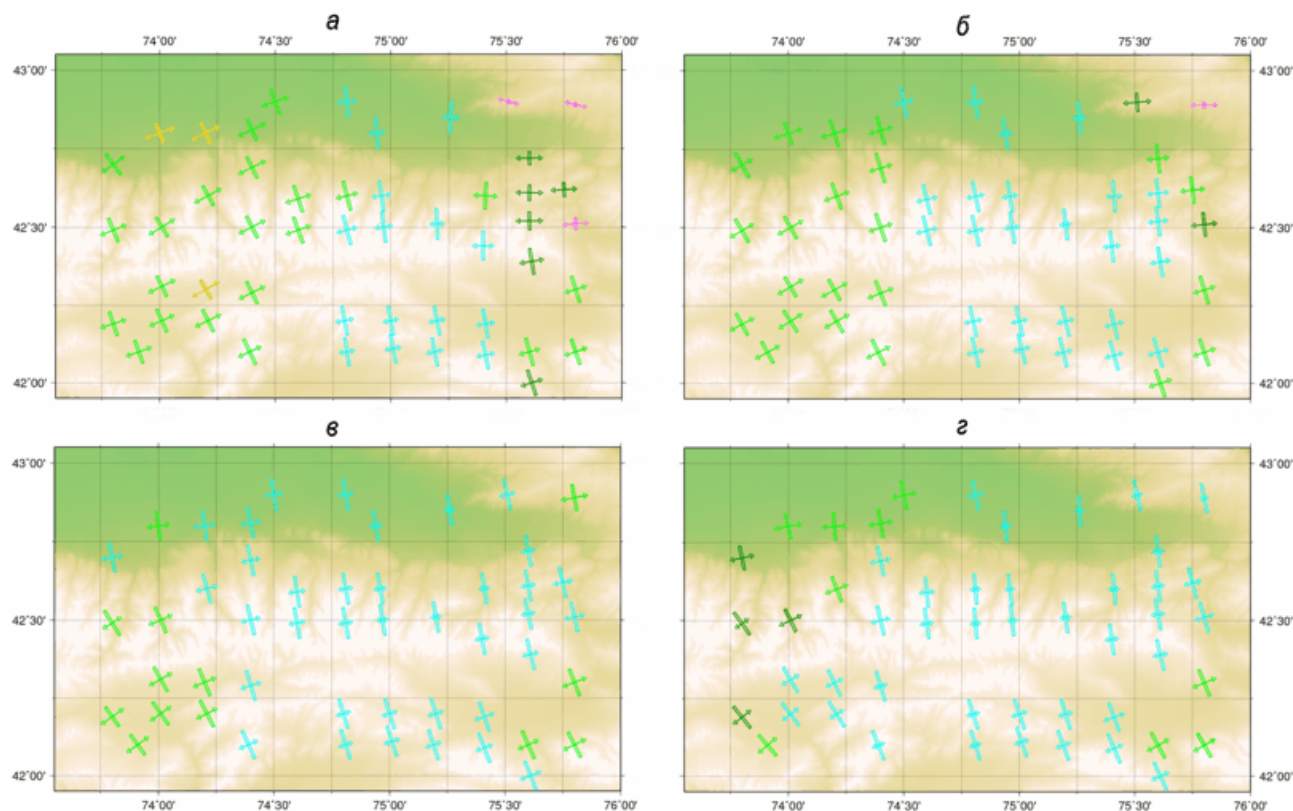


Рисунок 2.3.3-8 — Карты СТД для различных глубин: а -5 км; б-10 км; в-15 км; г-20 км.

Для того чтобы получить представление о деформации земной коры в целом, а не по отдельным компонентам (рис. 2.3.3-6), используется коэффициент Лоде-Надаи (μM) являющийся инвариантом тензора деформаций. Анализ этого коэффициента показал, что значительная часть исследуемой территории характеризуется деформацией сжатия ($\mu M > 0.2$) и только незначительная часть земной коры находится в условиях сдвига ($-0.2 < \mu M < 0.2$) – это район Суусамырской впадины (рис. 2.3.3-9а).

Как отмечалось выше, схема классификации режимов СТД основана на параметризации угловых параметров, одним из которых является угол вида напряженного состояния ω [Соколовский, 1969]. Площадное распределение значений угла ω представлено на рис. 2.3.3-9б. Минимальное значение этого угла характерно для восточной части Киргизского хребта и Джумгал-Тоо, что может свидетельствовать о повышенных напряжениях в горизонтальной плоскости этой территории. По схеме классификации эта зона характеризуется режимом транспрессии.

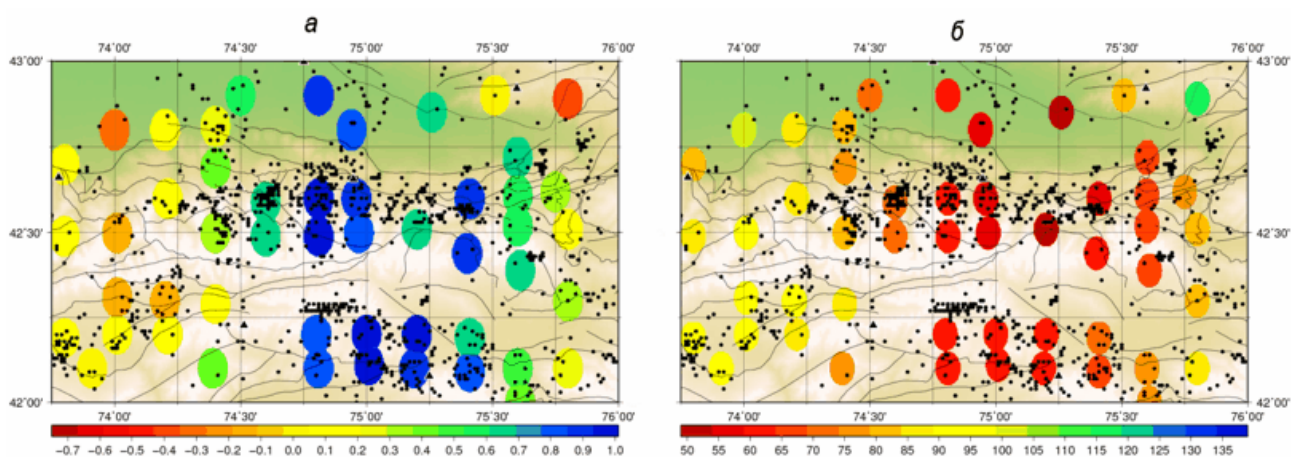


Рисунок 2.3.3-9 — Деформационные характеристики: а - распределение коэффициента Лоде-Надаи; б - распределение угла напряженного состояния (омега).

Из выражения для тензора скорости сеймотектонической деформации следует, что его компоненты определяются произведением тензора среднего механизма на скалярный множитель (интенсивность), представленный следующим выражением:

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{\mu TV} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} \quad (2.1)$$

где μ -модуль сдвига, V - элементарная объемная область, T – период исследования, M_0 – сейсмический момент землетрясения номер (α) . Для того чтобы найти фактическую величину скалярного множителя в формуле (8) и тем самым рассчитать v (скорость сеймотектонической деформации), можно выполнить непосредственное суммирование сейсмических моментов по данным каталогов землетрясений или же прибегнуть к оценке на основе закона повторяемости землетрясений [Резниченко, 1976]. Вычисления абсолютной величины среднегодовой скорости STD двумя способами были осуществлены в работе [Сычева и др., 2005]. Поскольку оценки, полученные на основе этих подходов, дали близкие результаты, остановимся подробнее лишь на первом из них.

Известное эмпирическое выражение связывает скалярный сейсмический момент M_0 в единицах $\text{дин} \cdot \text{см}$ с магнитудой землетрясения M : $\lg(M_0) = 15.4 + 1.6M$ [Ризниченко, 1976]. Для расчета скорости STD с использованием этой формулы была определена сумма сейсмических моментов всех землетрясений, которые попали на исследуемую территорию за 1994-2003 годы. Толщина сейсмоактивного слоя h , в соответствии с глубинами очагов на территории Киргизии, принята равной 30 км, модуль сдвига $\mu = 3 \times 10^{11} \text{ дин/см}^2$ [Ризниченко и др., 1976]. Подставляя эти значения в выражение (26), получаем оценочное значение интенсивности деформации для исследуемой территории $I_{\Sigma} \sim 6 \times 10^{-10} \text{ год}^{-1}$. Если

рассматривать отдельные области этой территории, то интенсивность меняется от 8×10^{-11} год⁻¹ в западной ее части до 7.5×10^{-10} год⁻¹ в восточной.

2.3.4 Сравнение полученных результатов с GPS данными

Наличие в Тянь-Шане сильных современных движений и деформаций земной коры было показано методами классической геодезии во второй половине 20-го века. Однако использовавшиеся тогда технологии не могли дать надежной количественной оценки этих движений. Для получения таких оценок в 1992 году было начато создание Центрально-Азиатской GPS-сети (ЦА-GPS) [Зубович, 2001]. Геодезические измерения, проводимые в рамках ЦА-GPS-сети, основаны на технологии GPS. Для обработки GPS-данных с целью получения оценок скоростей пунктов используется разработанный в MIT (Massachusetts Institute of Technology) программный пакет GAMIT/GLOBK [Herring et al., 2010a; 2010b; 2010c]. К настоящему времени ЦА GPS сеть содержит более 650 пунктов, для большинства из которых получена надежная оценка скорости движения.

Для моделирования деформационных процессов в земной коре Тянь-Шаня на основе каталога скоростей пунктов ЦА GPS сети разными исследователями применялись различные подходы. В частности, в [Зубович, 2001] была рассчитана дивергенция поля скоростей, в [Миди, 2001] была использована блочная модель, основанная на положении важнейших региональных разломов, в [Кузиков, Мухамедиев, 2010] был использован метод статистического выделения малодеформируемых блоков, в [Костюк, 2008] был использован подход, основанный на вычислении тензора градиента скорости поверхности земной коры.

В работе [Мансуров, 2015] был использован подход, позволяющий получить тензор скорости деформации в окрестности любой точки земной коры, что дает информацию о направлении главных осей деформации, ее скорости (относительное изменение площади) и максимально возможных величинах сдвиговых деформаций.

В качестве исходных данных был использован каталог скоростей 454 пунктов наблюдений ЦА GPS сети, для которых ошибки оценки скорости не превосходят 4 мм/год по горизонтальным и 8 мм/год по вертикальной компоненте.

Для расчета поля тензора скорости деформации был использован метод, основанный на взвешенном методе наименьших квадратов, предложенный в [Shen, 1996]. Аспекты применения этого метода к использованным данным подробно изложены в [Мансуров, 2015]. Расчет производился с использованием программного комплекса *SUR_GPS_STRAINS*, вопросы разработки которого изложены в [Мансуров, 2012].

Направление осей сжатия и растяжения. На рисунке 2.3.4-1 представлено направление осей сжатия по сейсмическим и GPS данным. Оба метода позволяют отметить,

что направление осей с запада на восток рассматриваемой территории меняется от северо-северо-западного к северному. В Восточной части исследуемой территории GPS метод показывает направление осей сжатия строго на север, а по сейсмическим данным его можно отметить как субмеридиональное.

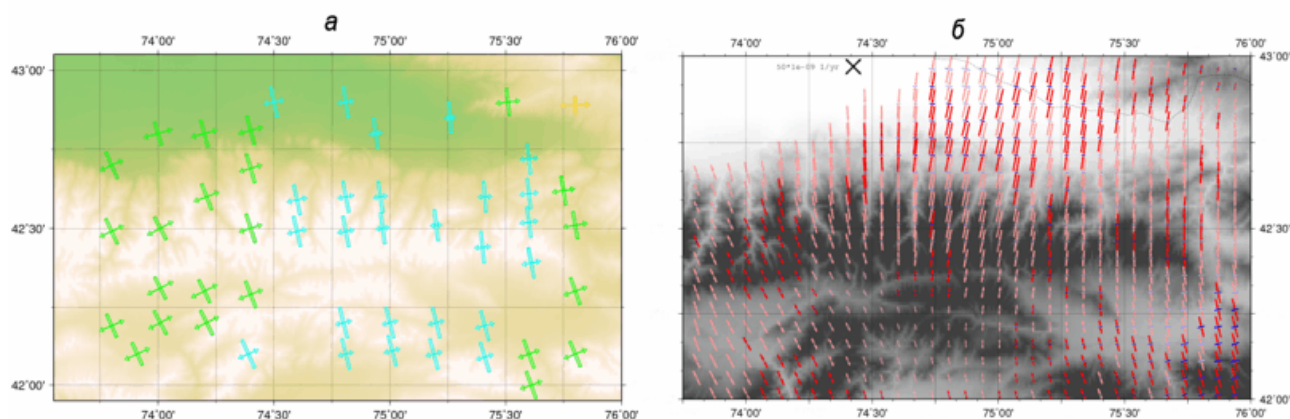


Рисунок 2.3.4-1 — Направление осей сжатия и растяжения по сейсмическим и GPS данным.

Дилатансия. Хрупкая деформация, которой сопровождаются землетрясения и отражаются в поле дилатансии – повышенными отрицательными значениями. На рис. 2.3.4-2 представлено распределение суммы горизонтальных компонент тензора скорости деформации по сейсмическим (рис. 2.3.4-2а) и GPS (рис. 2.3.4-2б) данным.

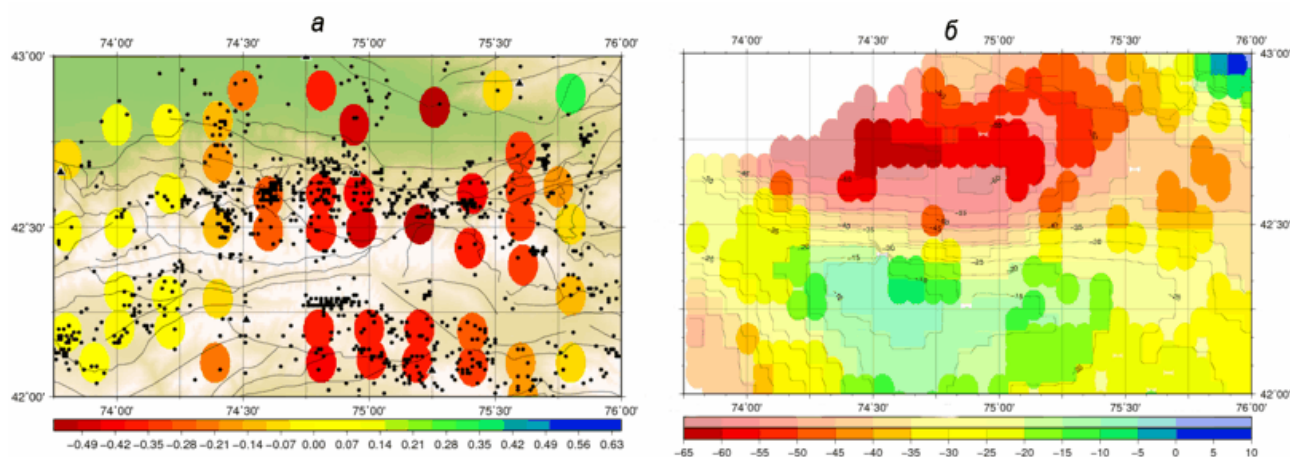


Рисунок 2.3.4-2 — Распределение суммы горизонтальных компонент тензора деформации по сейсмическим и GPS данным

Сравнение этих полей позволяет отметить только частичное их совпадение. На рис. 2.3.4-2 а показаны эпицентры землетрясений, используемых при анализе данных методом СТД. Исходя из расположения землетрясений можно отметить сейсмическую активность на территории Киргизского хребта и Джумгал-Тоо, что является свидетельством активных деформационных процессов и поле дилатансии в этих областях характеризуется

повышенными отрицательными значениями. Однако по данным GPS повышенные отрицательные значения наблюдаются только по территории Киргизского хребта. Несовпадение зон повышенных отрицательных значений поля дилатансии, полученных двумя методами можно объяснить различными геодинамическими состояниями земной коры на разных глубинах на территории Джумгал и Суусамыр Тоо.

Найденное значение среднегодовой скорости СТД имеет величину $0.6 \times 10^{-9} \text{ год}^{-1}$, что в среднем в 25 раз меньше среднегодовой скорости, полученной методом GPS ($\sim 10\text{-}30 \times 10^{-9} \text{ год}^{-1}$) [Зубович и др., 2001]. Такое соотношение между абсолютными величинами скоростей GPS-деформаций и СТД является естественным отражением следующего обстоятельства. Изменения длин горизонтальных линий (горизонтальные компоненты полной деформации), регистрируемые методом GPS, складываются из асейсмической части, куда основной вклад вносит, по-видимому, изменение упругой деформации, и косейсмической части, девиаторная часть которой рассматривалась как СТД. Прирост упругой деформации первичен как подготавливающий возникновение землетрясений, поэтому понятно, что вторая часть всегда меньше или даже существенно меньше первой.

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

Актуальность автоматизации при обработке данных геодезических наблюдений в НС РАН определяется значительным объемом разнородных многолетних данных геодезических наблюдений; сложностью и трудоемкостью процесса обработки и анализа; отсутствием устоявшихся методик и программного обеспечения для хранения, верификации, обработки и анализа геодезической информации для целей геодинамических исследований.

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 НС 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 НС 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 НС 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 по методике стабилизации временных рядов координат отдельных марок и пунктов, а также для группы компактно расположенных пунктов. 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 пересчётов 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 Разработка алгоритма стабилизации временных рядов координат GPS марок

Фактически лаборатория GPS НС 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. Однако после получения единого решения всегда остается около сотни проблемных марок (см. раздел 2.2), для которых после предварительного анализа могут быть выявлены причины ошибок. Но оперативно исправить все выявленные ошибки через повторный пересчет в GAMIT/GLOBK затруднительно. Соответствующие алгоритмы и программы после небольших дополнительных расчетов могут помочь максимально увеличить набор данных для последующего геодинамического анализа.

Вторая причина необходимости таких работ заключается в особенности влияния внешней системы отсчета (в нашем случае ITRF или EURO) на вариации рядов координат удаленных территорий (в нашем случае Центрально-Азиатский регион). В общем виде это влияние проявляется в виде повышенных амплитуд вариаций геодезических координат соседних пунктов по отношению к сравнительно небольшим относительным единовременным перемещениям этих пунктов [Кузиков, Образцова, 2011]. Пробные процедуры стабилизации координат ближайших пунктов позволил в 3-4 раза в горизонтальном плане и почти на порядок по вертикали повысить точность воспроизведения эталонных относительных смещений пунктов. Но при этом еще многие вопросы реализации требуют разрешения и программного воплощения.

В данном разделе речь пойдет только о взаимном преобразовании геоцентрических (картезианских XYZ) в топоцентрические координаты (NEH) для исследуемых марок одного

пункта или для разных пунктов. Здесь основная трудность заключается не в формульном преобразовании одних координат в другие, а в корректном выборе начала топоцентрических координат (и системы отсчета) и алгоритма слияния в один временной ряд координат (ВРК) марок одного пункта. Без алгоритмического решения и программного воплощения этого шага реализовать дальнейшие этапы этого направления не представляется возможным.

Итак, в качестве исходных данных здесь выступают временные ряды картезианских координат XYZ для исследуемых GPS марок, которые в результате единого решения получены из GAMIT/GLOBK в системе отсчета EURA или ITRF (табл. 3.1.1).

Таблица 3.1.1 – Примеры временных рядов геоцентрических картезианских координат для двух марок одного пункта локальной GPS сети.

Имя марки	Дата измерения	X, м	Y, м	Z, м
I23A_GPS	23.04.2003	1241218.0869	4523842.6754	4308590.3315
I23A_GPS	04.06.2005	1241218.0868	4523842.6681	4308590.3339
I23A_GPS	19.12.2010	1241218.0936	4523842.6585	4308590.3519
I23A_GPS	18.02.2011	1241218.0863	4523842.6551	4308590.3532
...	...	...	...	...
IV23_GPS	03.12.2002	1241217.6887	4523845.1350	4308588.0438
IV23_GPS	07.03.2003	1241217.6813	4523845.1283	4308588.0382
IV23_GPS	23.04.2003	1241217.6814	4523845.1290	4308588.0363
IV23_GPS	25.05.2003	1241217.6759	4523845.1229	4308588.0347
...	...	...	...	...

По определению начало геоцентрических координат находится в центре масс геоида, ось Z направлена вдоль оси вращения Земли через северный полюс, ось X направлена в точку пересечения нулевого меридиана (Гринвич) и экватора, и ось Y направлена в точку пересечения меридиана 90° и экватора (рис. 3.1-1). Общепринятые параметры движений наблюдаемых реперов привязываются сводятся к географическим сторонам света: северная, восточная и вертикальная компоненты скорости. В таких же локальных топоцентрических координатах NEU производится расчет скорости для каждого репера в процедурах GLOBK.

Однако NEU несколько отличаются от показанных на рисунке 3.1-1 координат NEH. Система координат (СК) NEU располагается так, чтобы ось U была перпендикулярна поверхности эллипсоида и при этом ось U (в зависимости от положения наблюдателя на поверхности эллипсоида) чаще всего пересекает ось Z на некотором удалении от начала координат. Для расчета таких координат n_i , e_i , u_i для некоторой точки "i" требуется знание не только значений картезианских координат x_i , y_i , z_i , но и значения геодезических координат l_i , b_i , a_i (долготы, широты и высоты), а также два параметра эллипсоида вращения. 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 НЕН. Для территории Центральной Азии отличия по вертикальной координате a_i и h_i составляет сотые доли миллиметра.

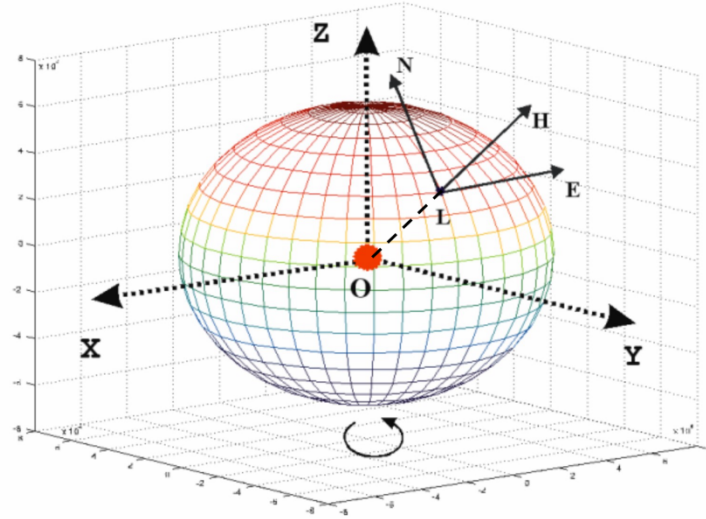


Рисунок 3.1-1 — Пространственное соотношение геоцентрических картезианских координат XYZ и топоцентрических НЕН.

Итак, для перехода от СК XYZ к НЕН, необходимо знать координаты точки x_i , y_i , z_i и координаты радиус вектора $\overrightarrow{OL}$ (x_L , y_L , z_L) для переноса и вращения координат. Для целей анализа временных рядов координат одной или нескольких марок вполне достаточно в качестве $\overrightarrow{OL}$ использовать среднее значение всех анализируемых в данный момент координат x_i , y_i , z_i . После определения значений x_L , y_L , z_L определяем знак угла вращения вокруг оси Z. Если $y_L < 0$, то $saZ = -1$, в противном случае $saZ = +1$. Тогда угол вращения вокруг оси Z:

$$aZ = saZ \times \arccos\left(\frac{x_L}{\sqrt{x_L^2 + y_L^2}}\right) \quad (3.1)$$

Промежуточное значение x_L после поворота вокруг оси Z станет:

$$x_{1L} = x_L \times \cos(aZ) + y_L \times \sin(aZ) \quad (3.2)$$

Определяем знак угла вращения вокруг оси Y, которая уже соответствует оси E. При $z_L < 0$, то $saY = -1$, в противном случае $saY = +1$. Тогда угол вращения вокруг оси Y (E):

$$aY = saY \times \arccos\left(\frac{x_{1L}}{\sqrt{x_{1L}^2 + z_L^2}}\right) \quad (3.3)$$

Определяем величину переноса начала координат из точки О в точку L (рис. 3.1-1) вдоль дважды преобразованной оси X(H):

$$\Delta H = \sqrt{x_L^2 + y_L^2 + z_L^2} \quad (3.4)$$

Получены все необходимые данные для пересчета координат x_i , y_i , z_i в n_i , e_i , h_i :

$$e_i = -x_i \times \sin(aZ) + y_i \times \cos(aZ) \quad (3.5)$$

$$x_{1i} = x_i \times \cos(aZ) + y_i \times \sin(aZ) \quad (3.6)$$

$$n_i = -x_{1i} \times \sin(aY) + z_i \times \cos(aY) \quad (3.7)$$

$$h_i = x_{1i} \times \cos(aY) + z_i \times \sin(aY) - \Delta H \quad (3.8)$$

Первая ступень перехода от геоцентрических координат к локальным топоцентрическим прямоугольным координатам алгоритмически обозначена. 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. Здесь важным является поиск критерия для оценки качества выборки для автоматической проверки ВРК всех марок, и научить алгоритм распознавать и чистить неблагополучные значения в рядах координат.

Другим полезным аспектом вышеописанной процедуры 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. В этом случае 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. Есть несколько вариантов процедуры объединения ВРК. Нами предлагается сначала выделить марку с наиболее представительным ВРК на основе продолжительности и количестве измерительных эпизодов (сессий). Естественным образом, на пункте должно быть не менее 3-х измерений и как минимум на одной марке должно быть 2 измерения. Для этой процедуры нами предложен эмпирически подобранный критерий:

$$Cr = \Delta T + \ln(qm) + \log(\Delta T/qm), \quad (3.9)$$

где ΔT – интервал измерений марки (годы), qm – количество измерений марки.

Все эти параметры вычисляются достаточно просто и могут быть использованы в автоматическом режиме. 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 C_t . Для другой марки пункта рассчитываются средние значения дат измерений $avgD$ и координаты $avgX$. По линейному тренду основной марки находим значение X_c со значением $avgD$. Прибавляем к значениям X_i второстепенной марки величину $(X_c - avgX)$. Для нового общего ряда координат рассчитываем новый линейный тренд, скорость и регулярные отклонения измеренных значений от тренда. Для дальнейшего анализа временных рядов уже пунктов имеет смысл сделать процедуру обратного преобразования координат из NEH в XYZ с использованием уже известного радиус вектора $\overrightarrow{OL} (x_L, y_L, z_L)$ для обратного переноса и вращения координат. Но это уже будет реализовано в будущем году.

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

Сотрудники Научной станции проводят режимные линейно-угловые измерения (ЛУИ) на детальных геодезических площадках с 2006 г. При этом формируется банк данных с фиксацией 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 геодинамических 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 геодинамическом 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 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 БГП 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).

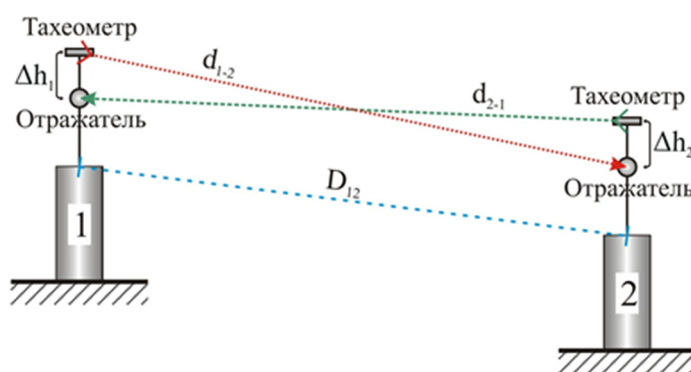


Рисунок 3.2-1 — Типичное соотношение длин прямого (d_{1-2}), обратного (d_{2-1}) измерений и оцениваемого расстояния (D_{12}) между реперами центрировочных столиков двух монументов при наличии разности высот тахеометра и отражателя (Δh_1 , Δh_2).

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. Опытные-методические работы по сравнению устойчивости оценок измерений на разных расстояниях по сходимости результатов полных циклов ЛУИ показали, что до 1 км использование втулочного основания для отражателя дает гораздо более узкие диапазоны разброса длин, чем для трегера. При этом увеличилось число измеряемых параметров, которые могут влиять на итоговые результаты измерений за один цикл ЛУИ (рис. 3.2-2).

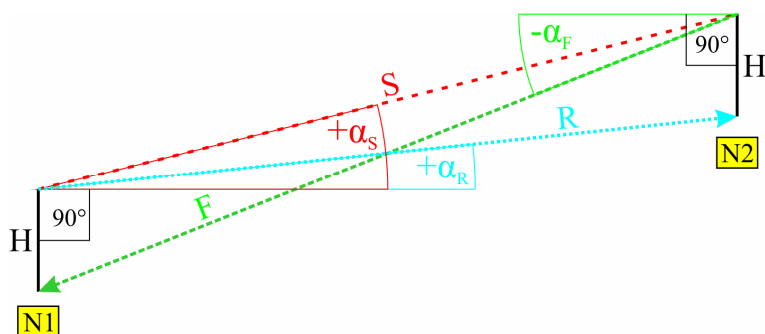


Рисунок 3.2-2 — Типичное соотношение линейно-угловых величин при прямом и обратном измерениях БЛ, где:

$N1$, $N2$ – номера геодезических реперов; H – превышение (~ 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 , α_F , R , α_R поставляются из прямых и обратных линейно-угловых измерений. На первый взгляд для определения S и α_S каждой БЛ для цикла достаточно их вычислить из 2-х наборов данных (H , F , α_F) и (H , R , α_R), а потом найти их среднее. Однако иногда по тем или иным причинам один из параметров F , α_F , R или α_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.

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. Причина этого объясняются рисунками 3.2-1 и 3.2-2. Повышенные значения длин, на 15-20 мм относительно среднего значения по ряду, для 2-х БЛ в направлении измерений с одного пункта "0", довольно сложно объяснить. 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, что, и отражено в таблице 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. Причина этого объясняются рисунками 3.2-1 и 3.2-2. Повышенные значения длин, на 15-20 мм относительно среднего значения по ряду, для 2-х БЛ в направлении измерений с одного пункта "0", довольно сложно объяснить. 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, что, и отражено в таблице 3.2.1.

Здесь приведена только одна объективная причина одностороннего отклонения результата измерений не геодезического характера, на самом деле таких причин и случаев может встречаться больше при анализе временных рядов линейно-угловых параметров. Естественным образом возникает желание исключить или нивелировать такие экстремумы параметра. Ведь в этом случае среднее арифметическое прямых (SF, α SF) и обратных (SR, α 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.

Для решения этой проблемы нами предлагается следующая последовательность действий. Для прямого и обратного измерений вычислить искомые общие параметры S и α S (длина и вертикальный угол, рис. 3.2-2) можно 10-ю вариантами сочетаний величин F, α F, R, α R и H. Причем не варьирующая величина превышения тахеометра над отражателем H с одной стороны создает дополнительные вычисления, с другой стороны служит эталоном при вычислениях и может быть критерием валидности измеренных параметров.

Было замечено, что расчет среднего по 10 вариантам S и αS не всегда дает искомый нами эффект фильтрации ошибочных всплесков. Дело в том, что из 10 выше обозначенных способов вычисления S и αS два способа используют: H и только вертикальные углы αF , αR ; H и только длины F , R . При сочетании H , αF , αR вычисляемый вертикальный угол αS для временного ряда имеет самые малые вариации и это плюс. Но при этом расчетное расстояние S может иметь самые невероятные значения, которые дискредитируют среднее значение длины БЛ. Аналогичным образом, сочетание входных данных H , F , R вычисляемое расстояние S имеет наиболее устойчивый временной ряд, но вертикальный угол αS может принимать самые экзотические значения.

На первый взгляд достаточно исключить из расчета длины S вариант с входными данными H , αF , αR , а при вычислении αS не использовать сочетание H , F , R . Да это решит проблему, но только в ее явно обозначенном выше проявлении. Нами встречены единичные случаи, когда уже для 9 вариантов расчета S и αS встречаются аномальные (хотя и не столь высокие как в предыдущем примере) отдельные значения S и αS , которые достаточно значительно искажают временной ряд. Если мы не можем предусмотреть всех возможных вариантов, которые могут повлиять на нашу оценку параметров ЛУИ, то необходим другой подход для решения задачи по корректному расчету S и αS на основе данных прямых и обратных ЛУИ.

В этом случае помог уникальный критерий на основе t -статистики Стьюдента, который был нами впервые применен при группировке векторов скорости в кластеры по параметрам согласованного (как жесткое целое) группового движения GPS пунктов [Кузиков, 2007; Кузиков, Мухамедиев, 2010]. В данном случае этот критерий адаптируется и вычисляется для модулей отклонений отдельных значений S и αS от средних величин при пошаговом удалении из выборки средних значений максимально отличающегося от среднего варианта расчета искомой величины (S или αS). Удаление прекращается тогда когда критерий достигнет самого минимального значения, а это будет зависеть не только от величины отклонения от среднего, но и от количества значений в выборке средних.

В данной интерпретации алгоритм увязки прямых и обратных ЛУИ может считаться решенной задачей, реализованной в виде тестовой программы на языке PERL. Но без достаточного количества расчетов на реальных данных и их проверки гарантировать оптимальное решение этой задачи пока нельзя. Кроме этого, есть вариант – исследовать вопрос о возможности увязки прямых и обратных ЛУИ с использованием данных ближайших по времени циклов. Предпосылки для этого заключаются в том, что временные ряды длин прямых и обратных измерений для одной БЛ всегда имеют высокую положительную корреляцию >0.9 . Поэтому если для соседнего цикла все соответствующие

параметры прямых и обратных измерений отличаются не более некоторой разрешенной величины, то эти данные могут выступать в качестве опоры (эталона) для текущего (исследуемого) цикла, у которого между параметрами F , αF , R , αR есть критические отличия. Причем по уровню значений наблюдаемых параметров для исследуемого цикла не противопоказано даже значительное отличие от эталонного цикла, но эти отличия должны быть согласованы со всеми параметрами прямого и обратного измерения. Т.е. такой подход не сможет исключить значительные всплески любого параметра ЛУИ, если они согласованы с другими одновременными параметрами измерения БЛ за текущий цикл.

Таким образом, практическая проверка построенного алгоритма и предложенного (с использованием данных разновременных измерений) могут завершить процесс поиска вариантов увязки прямых и обратных измерений БЛ и перейти к пространственной увязке параметров по всем БЛ площадки с выходом на трехмерные локальные координаты.

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

С июня 2012 г и по настоящее время на детальных площадках POLIGON, KENTOR и ALMALY регулярно проводятся комплексные геодезические наблюдения за режимом деформирования на отдельных участках активных разломов в пределах Бишкекского геодинамического полигона (рис. 4-1).

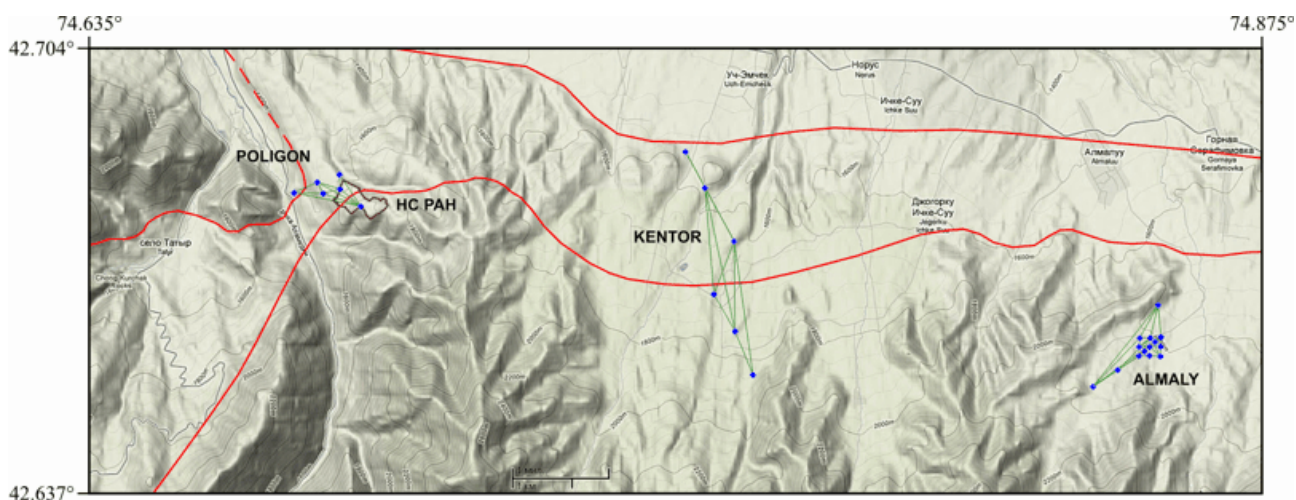


Рисунок 4-1 — Положение геодезических площадок POLIGON, KENTOR и ALMALY относительно территории НС РАН и активных разломов (красные линии). Зеленым цветом показаны базовые линии светодальномерных измерений в прямом и обратном направлении с частотой 1 раз в неделю. Синие ромбики – фундаментальные реперы.

Территория исследования расположена в подножии северного склона Киргизского хребта (Центральный Тянь-Шань). Основная цель данных работ – проверка предположения о том, что зоны активных разрывных нарушений 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 простирания зоны разлома, относительно сторон света. Важным здесь будет и сравнение исследуемых геодезических параметров с данными других геолого-геофизических направлений.

В главе анализируются данные линейно-угловых, нивелировочных и GPS измерений, полученные с июня 2012 г по октябрь 2015 г на трех детальных геодезических площадках, которые удалены друг от друга в широтном направлении на расстоянии от 6 до 14 км, и расположены вдоль линии широтного 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 измерений (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 вида) делается в среднем 5 записей с автоматическим усреднением по 10 отсчетов, 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 проводится 2 раза в год. В 2015 г на каждой площадке проведено по 2 цикла нивелирования. 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 сохранения 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. Для 11 БЛ площадки были проанализированы 155 циклов измерений с 04.05.2012 по 13.10.2015. В характере вариаций длин БЛ площадки четко обозначаются 3 синхронных всплеска их удлинения: 08.08.2012 на ~35 мм (11 БЛ), 01.03.2013 на ~10 мм (8 БЛ), 22.12.2014 на ~20 мм (11 БЛ). Также четко обозначаются тенденции сезонных колебаний в пределах ~5 мм с длиной волны ~1 год с максимумами в летнее время и с минимумами в холодное время года (рис. 4.1-1). С большой долей определенности сезонные вариации связаны с состоянием атмосферы, а не с геодинамическими факторами состояния земной коры.



Рисунок 4.1-1 — Типичный характер вариаций длин БЛ для площадки POLIGON.

Помимо обозначенных выше резких увеличений длин для отдельных БЛ отмечаются дополнительные экстремумы (до 20 мм), не повторяющиеся на других линиях. А для БЛ P1=2 и P2=3 отмечается наличие только 2-х самых интенсивных экстремумов и довольно ровный ряд, с минимальным интервалом регулярных вариаций (рис. 4.1-2).



Рисунок 4.1-2 — Характер вариаций длин БЛ P1=2 и P2=3.

Иногда вариации БЛ площадки POLIGON обозначают слабовыраженный наклон линейного аппроксимирующего тренда, составляющего десятые доли мм/год. Достаточно объемные временные ряды длин БЛ с экстремальными значениями, в несколько раз больше фоновых вариаций, способствуют высокому уровню парных коэффициентов корреляции (КК мин. – 0.45, средний – 0.77). Теоретически при расчетах КК можно исключать экстремальные значения из рядов длин. Если принять во внимание только самые высокие значения КК (>0.9), то выделяются три основных кластера БЛ (рис. 4.1-3).

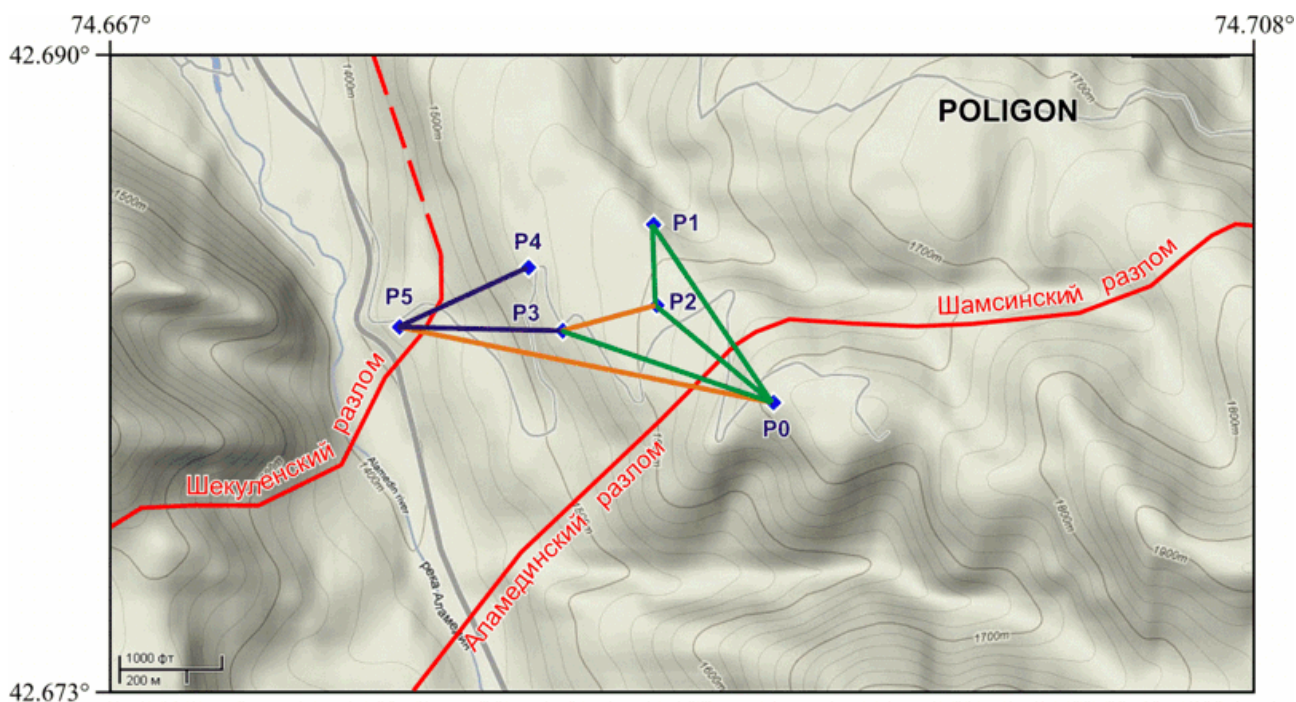


Рисунок 4.1-3 — Разными цветами отражены 3 кластера базовых линий с максимальными коэффициентами корреляций (>0.9) для временных рядов изменения длин БЛ площадки POLIGON за 2012-2015 гг.

За малым отличием эти группы повторяют прошлогодние кластерные оценки (без данных 2015 г) и имеют внятный геодинамический смысл. Кластер БЛ P01 + P02 + P03 + P12 отражает общность движений, связанных с влиянием Аламедин-Шамсинского разлома. Помимо пространственного положения и близости эти БЛ имеют сходные СЗ простирания. Кластер БЛ P35 + P45 также имеет особое пространственное положение, СВ ориентировку и может отражать "дыхание" Шекуленского разлома. Линии P23 + P05 отражают характер движений срединной меж разломной области, имеют около широтное простирание.

Площадка KENTOR. Здесь для 10 БЛ накоплено 144 циклов измерений с 06.06.2012 по 07.10.2015. Для длин БЛ площадки также чаще всего выделяется 3 синхронных всплеска удлинения: 03.08.2012 на ~35 мм (10 БЛ), 20.12.2012 на ~15-30 мм (7 БЛ), 24.12.2014 на ~15-20 мм (10 БЛ). Причем первый и последний всплеск приходятся на сходные сроки измерений (2-5 дней разница). На площадке KENTOR менее четко проявлены фоновые сезонные вариации длин в пределах ~5 мм с длиной волны ~1 год с максимумами в летнее время и с минимумами в холодное время года (рис. 4.1-4).

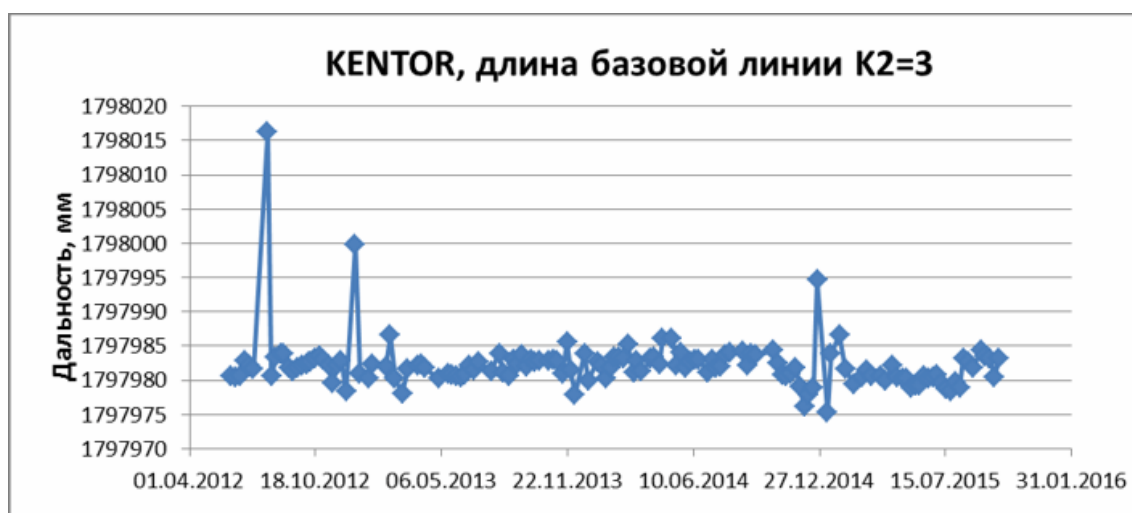


Рисунок 4.1-4 — Типичный характер вариаций длин БЛ для площадки KENTOR.

Здесь также в 2-х случаях ($K1=5$ и $K2=5$) отмечаются только первый и последний экстремум. Помимо обозначенных выше резких удлинений длин для 3-х БЛ площадки зафиксированы не синхронные отрицательные экстремумы от -50 до 100 мм, на которые стоит обратить внимание с точки зрения проявлений технических ошибок (рис. 4.1-5).

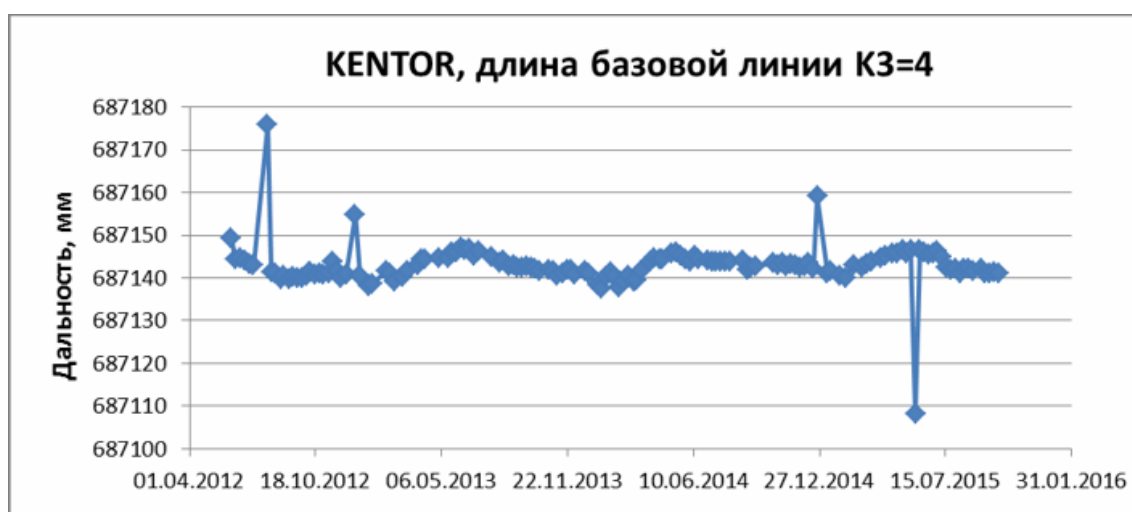


Рисунок 4.1-5 — Проявление экстремума укорочения длин БЛ для площадки KENTOR.

На площадке KENTOR временные ряды длин БЛ имеют следующий уровень парных КК: мин. – 0.24, макс. – 0.94, средний – 0.64. Принимая во внимание $КК > 0.84$, то можно выделить два основных кластера БЛ (рис. 4.1-6).

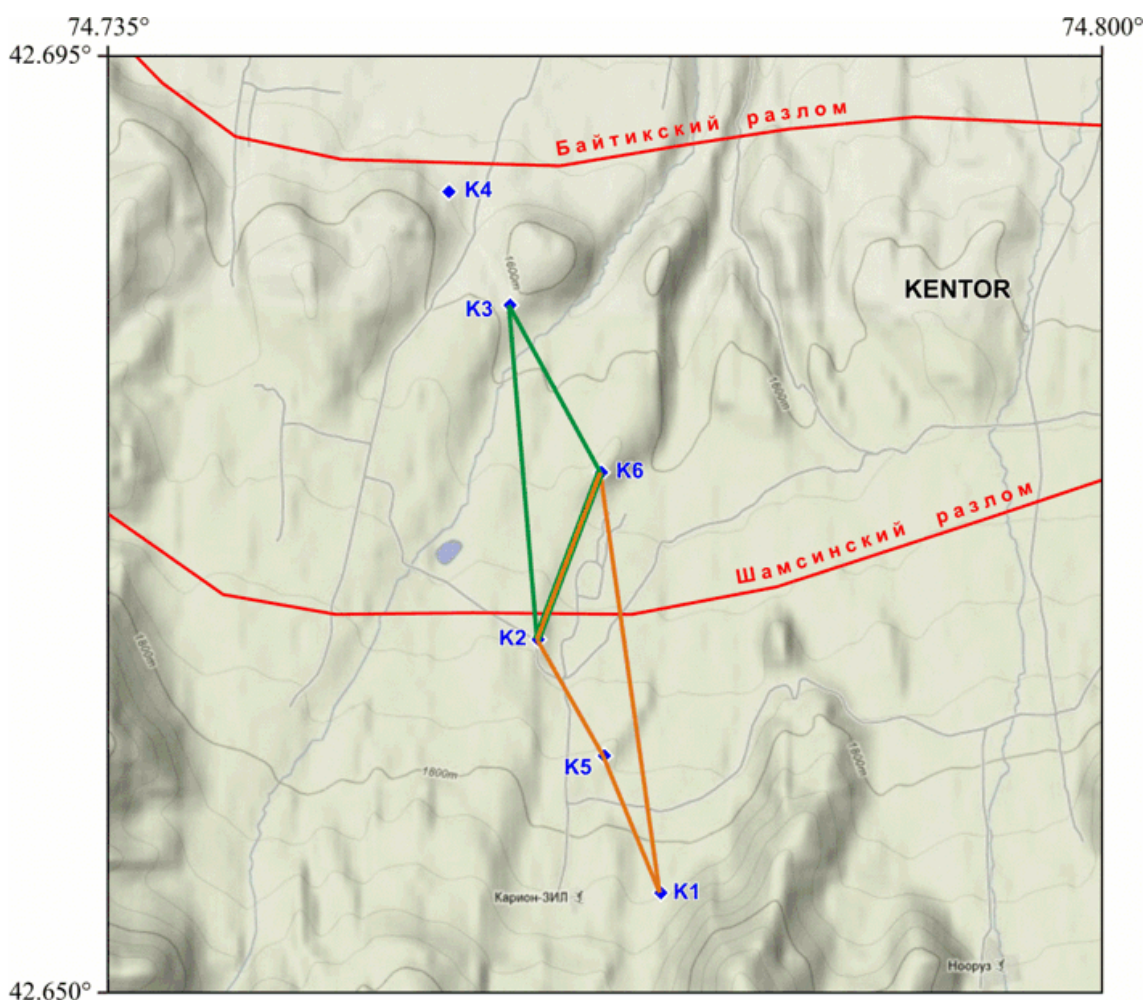


Рисунок 4.1-6 — Разными цветами отражены 2 кластера базовых линий с высокими коэффициентами корреляций (>0.84) для временных рядов изменения длин БЛ площадки KENTOR за 2012-2015 гг.

Эти кластеры несколько отличаются от прошлогодних групп (без данных 2015 г). Три БЛ K26 + K23 + K36 (зеленые) образуют кластер к северу от Шамсинского разлома, другие 4 БЛ (оранжевые) образуют кластер к югу от разлома. При этом через БЛ K26 эти кластеры имеют также высокие КК, но более низкого уровня. Скорее всего, такая сложная корреляционная картина отражает влияние движений в зоне Шамсинского разлома.

Площадка ALMALY.

Здесь измерению подлежат всего 23 БЛ (рис. 4.1-7), но по разным причинам (погодные условия, более поздняя установка пунктов и др.) с 07.06.2012 по 14.10.2015 получено 149 циклов измерений для 15 БЛ, и с 28.03.2013 по 14.10.2015 имеется 115 циклов измерений для 8 БЛ. 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.

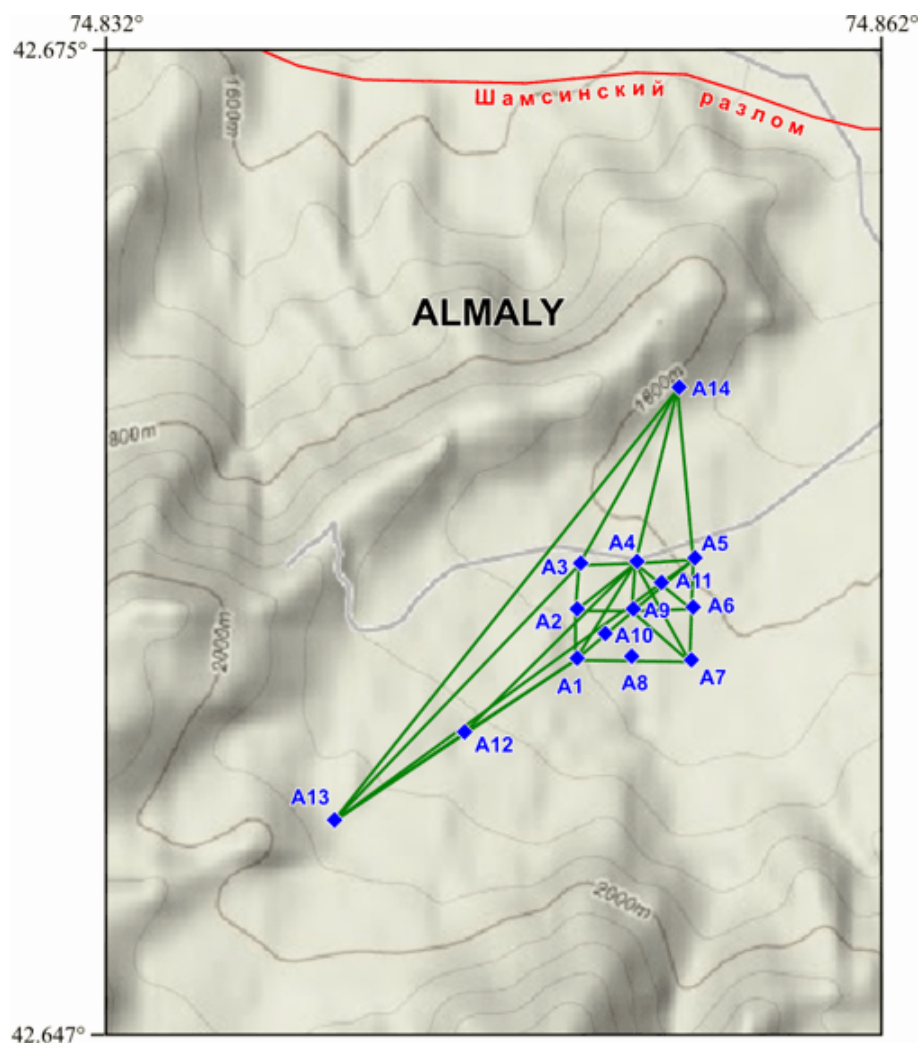


Рисунок 4.1-7 — Геодезические реперы (14) и базовые линии (23) линейно-угловых измерений на площадке ALMALY. Красная линия – активный разлом.

Для всех БЛ площадки в общем случае выделяется 2 устойчивых синхронных всплеска удлинения: 08.08.2012 на ~25-45 мм (15 БЛ), 25.12.2014 на ~15-45 мм (23 БЛ). Эти удлинения БЛ приходятся на такие же сроки измерений (до 2 дней разница) как и на всех остальных площадках (рис. 4.1-8). Декабрьская аномалия 2014 г характерна тем, что здесь проявлена деформационная анизотропия. Наиболее длинные БЛ имеют приращения дистанций на 15-20 мм, а короткие базы удлиняются на 35-45 мм. Кроме этого, в направлении запад-восток для коротких дистанций отмечается удлинение на 15-17 мм, а в меридиональном направлении удлинения составляют 30-45 мм.



Рисунок 4.1-8 — Типичный характер вариаций длин БЛ для площадки ALMALY.

Помимо интенсивных (до 4 см) короткопериодных (1-2 недели) экстремумов для длин БЛ обращают на себя внимание аномалии до 1 см с продолжительностью несколько месяцев (рис. 4.1-9).

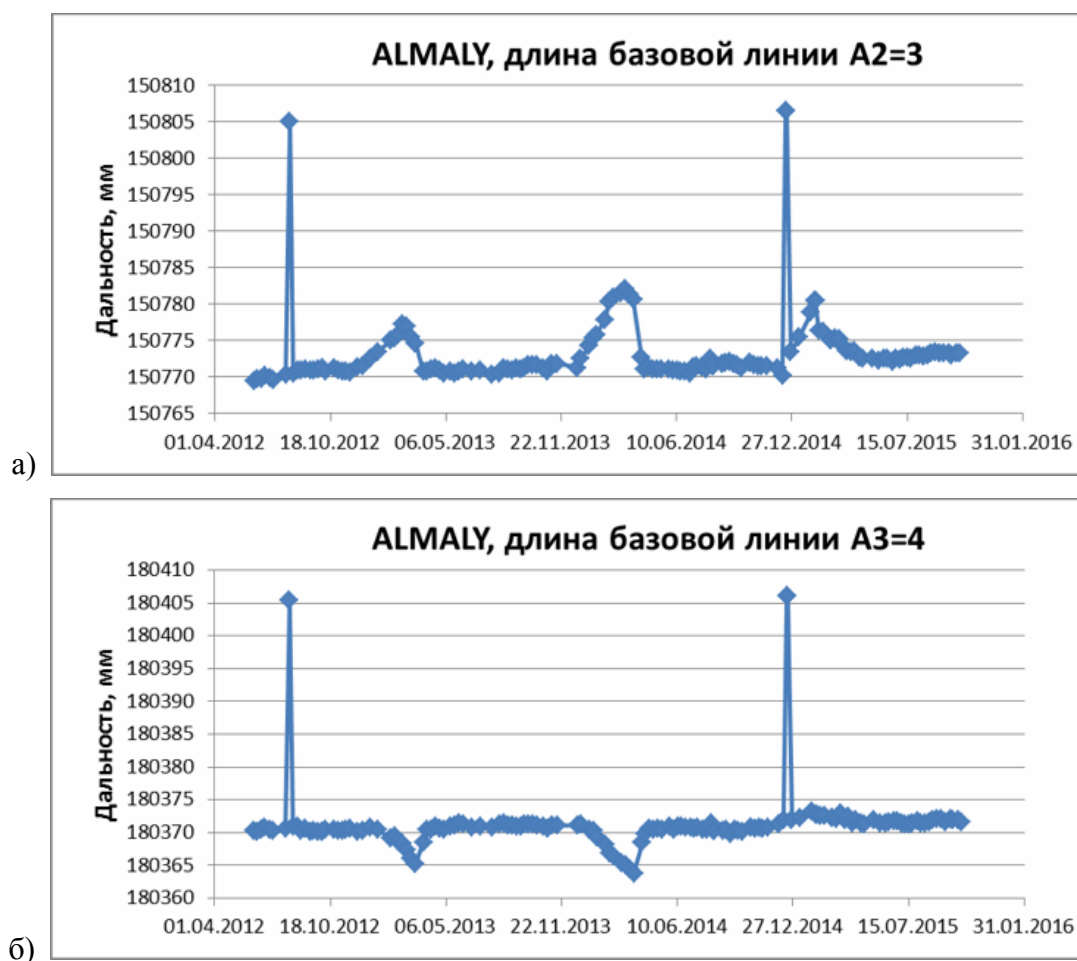


Рисунок 4.1-9 — Примеры проявления разнохарактерных деформационных аномалий на различно ориентированных базовых линиях площадки ALMALY: а) – БЛ A2=3 направление С-Ю; б) – БЛ A3=4 направление В-З.

Здесь отмечается наличие 2-х аномалий одной природы. Первая аномалия произошла 12.2012÷03.2013 с меридиональным удлинением (БЛ A2=3) на ~7 мм и широтным укорочением (БЛ A3=4) на ~5 мм. Следующий цикл возмущения случился через год 12.2013÷04.2014 с меридиональным удлинением (БЛ A2=3) на ~10 мм и широтным укорочением (БЛ A3=4) на ~7 мм. Будет интересным здесь отметить, что ровно 6 лет назад (с точностью до нескольких дней в 2006÷2008 гг.) на этих же БЛ были такие же 2 аномалии аналогичные по уровню (разница не более 1-2 мм), последовательности и длительности. Причем аномалии 2006÷2008 гг. были подтверждены GPS данными и проявились таким же образом на площадке NORUS в 5 км к западу.

На рисунке 4.1-9 выделяется еще одна аномалия 12.2014÷04.2015, природа которой отличается от предыдущих всплесков длин с зеркальным проявлением деформации по отношению к сторонам света. У этой аномалии меридиональное удлинение (БЛ A2=3) составило ~10 мм, это повторяет характер предыдущих аномалий. Но вот в широтном направлении (БЛ A3=4) здесь мы наблюдаем не укорочение, а также удлинение до 3 мм. Следует отметить и тот факт, что на эту длительную аномалию явно накладывается короткопериодный всплеск на ~35 мм, который проявляется на всех БЛ площадки.

Еще следует отметить, что влияние долгопериодных аномалий пространственно ограничивается ближайшими к тумбе A3 реперами (A2, A4, A6, A7, A9), чем ближе к A3, тем сильнее проявление аномалии. Таким образом, на площадке ALMALY по данным ЛУИ зафиксировано как минимум 3 вида деформационных аномалий, имеющих разный характер проявлений и, скорее всего, разные факторы их генерации.

Достаточно большие по объему временные ряды длин БЛ с экстремальными значениями способствуют здесь высокому уровню парных коэффициентов корреляции (КК мин. – 0.60, средний – 0.91). Такие высокие показатели КК не позволяют качественно провести кластеризацию БЛ. Используя только самые максимальные значения КК = 0.98-0.99, можно выделить одну группу из 8 базовых линий в центральном квадрате площадки ALMALY (рис. 4.1-10). Сюда вошли БЛ: A1=4, A2=9, A4=5, A4=6, A4=7, A4=9, A6=9, A7=9. Скорее всего, самым очевидным фактором, связующим эти БЛ, является их принадлежность к пунктам A4 и A9. Можно предположить, что эти реперы образуют единый блок с однотипным режимом движений относительно других пунктов площадки ALMALY.

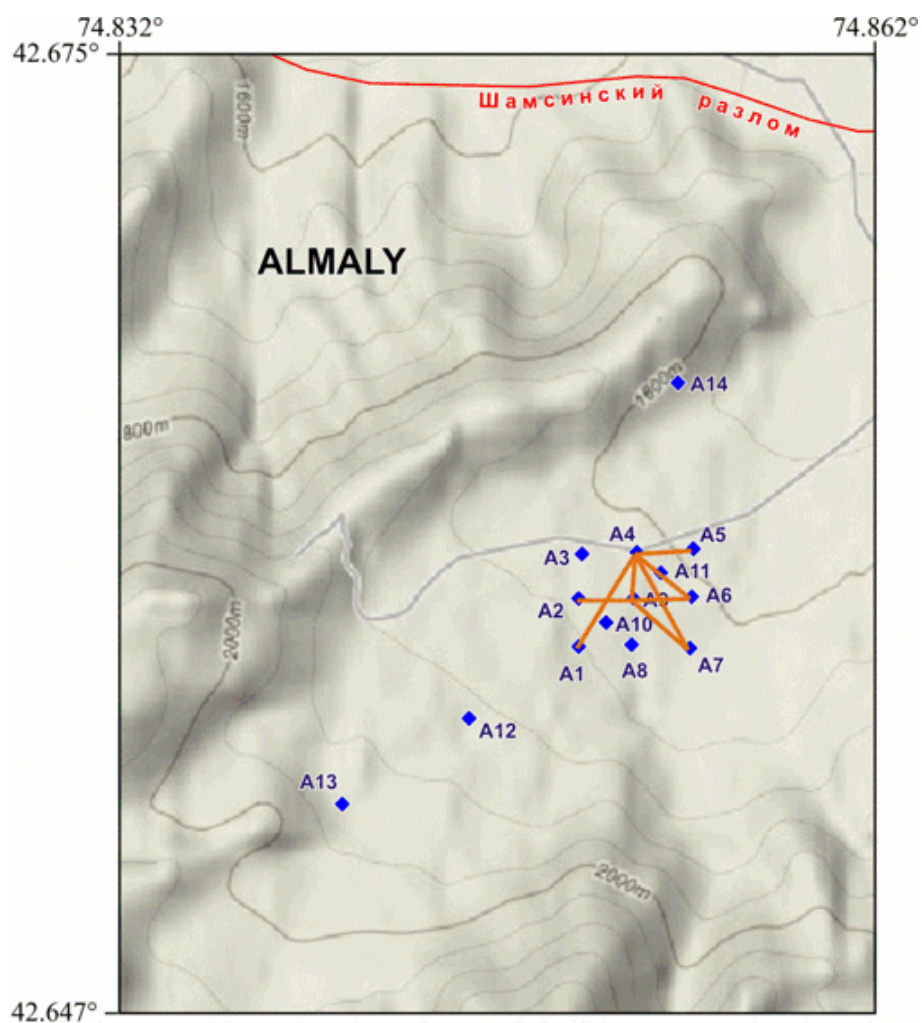


Рисунок 4.1-10 — Группа базовых линий с высокими коэффициентами парной корреляции между временными рядами длин за 2012-2015 гг. на площадке ALMALY

4.2 Нивелирование геодезических площадок

Нивелирование площадки 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).

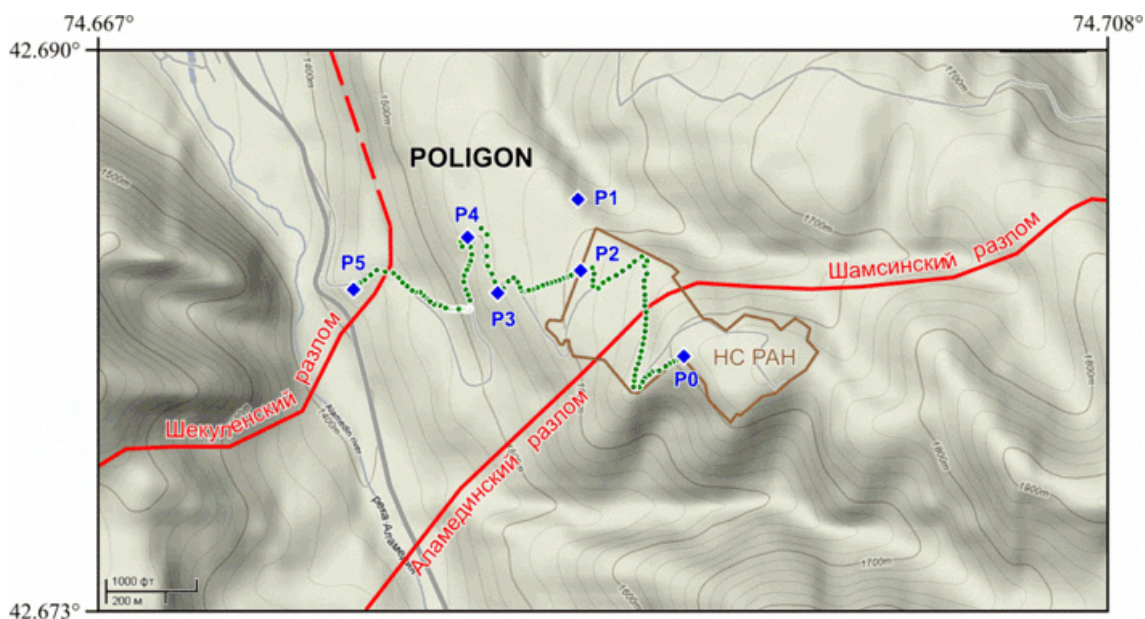


Рисунок 4.2-1 — Линия нивелирования на площадке POLIGON, проходящая по реперам P0, P2, P3, P4 и по промежуточным пунктам (костылям – зеленые точки)

С момента заложения данной площадки и по ноябрь 2015 г проведено 7 циклов измерений. 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; Н – 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

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

Нивелирование площадки 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).

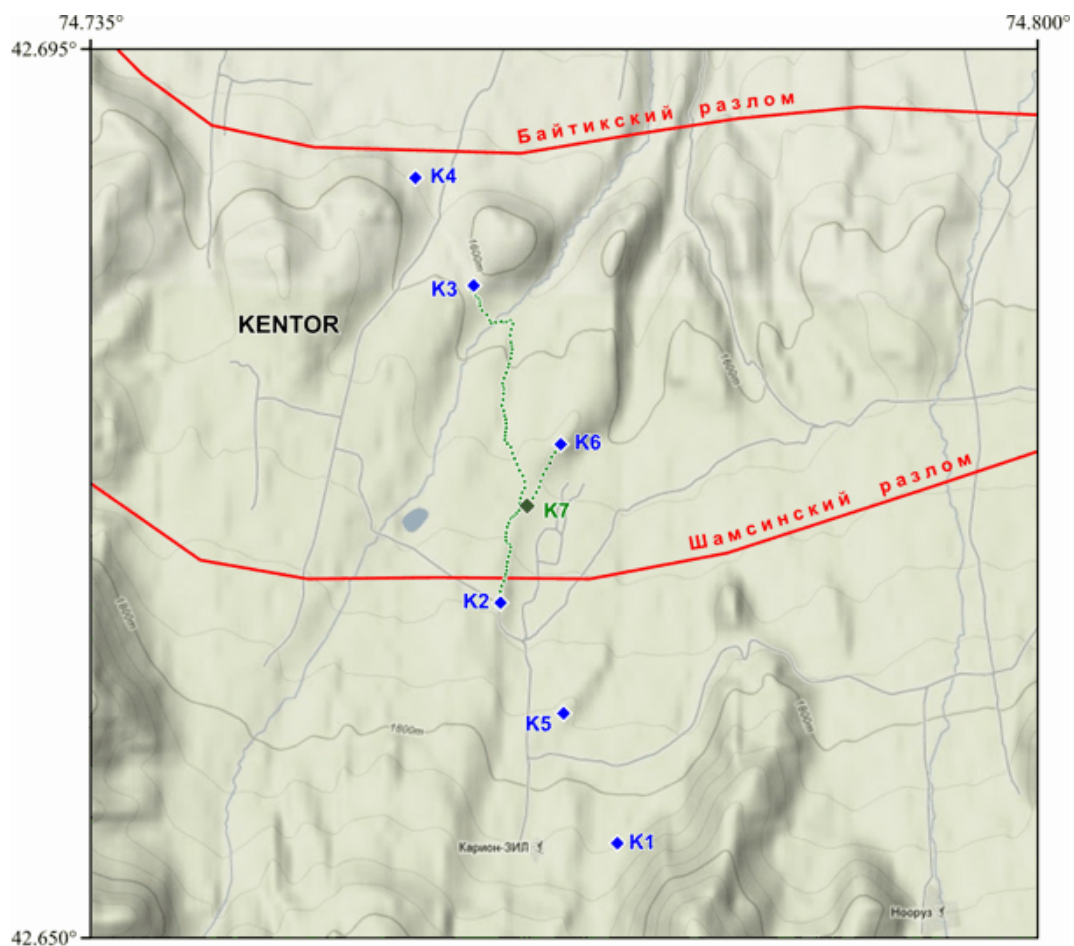


Рисунок 4.2-2 — Нивелирный профиль на площадке KENTOR, состоящий из 3-х сегментов: K2-7, K3-7 и K6-7. K7 – промежуточный фундаментальный нивелировочный пункт. Зеленые точки – промежуточные пункты с закладкой костылей. Красные линии – активные разломы.

На ноябрь 2015 г проведено всего 7 циклов измерений. 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 наибольшие расхождения между двумя ходами нивелирования (Δh). Поэтому говорить о какой-либо тенденции в движении реперов по высоте нет веских оснований.

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

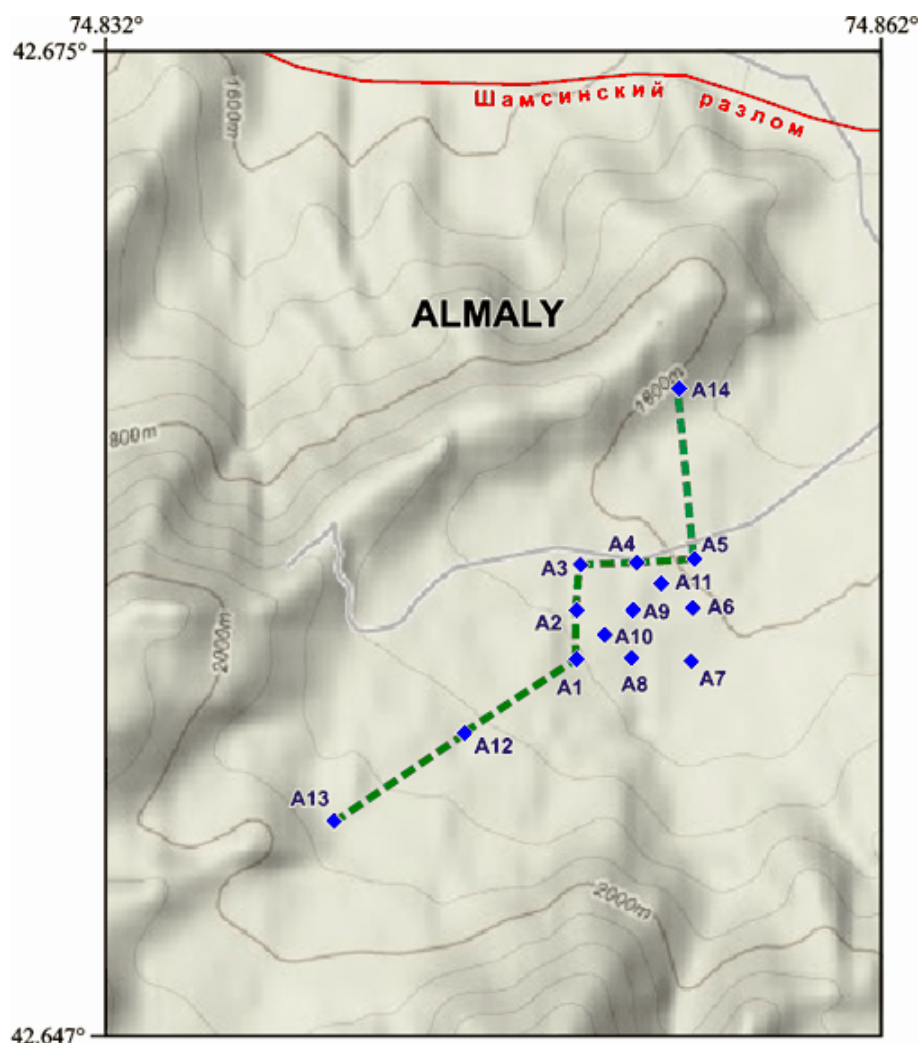


Рисунок 4.2-3 — Нивелирный профиль на площадке ALMALY. Красная линия – активный разлом

На ноябрь 2015 г здесь проведено 7 циклов измерений. Результаты нивелирования по площадке ALMALY сведены в таблице 4.2.3. Также как и на других площадках, здесь превышения между реперами варьируют в пределах 1-2 мм без проявления какого-либо тренда в движении по вертикали. Оценки ошибок нивелирования на данной площадке наилучшие из всех других площадок $\Delta h \leq 1.5$ мм. Но приписывать возвратно-поступательным вариациям вертикальной компоненты геодинамический фактор нет веских оснований.

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

Год-месяц	Секция; Н – превышение фундаментальных реперов, мм						
	hA12=13	hA1=12	hA1=2	hA2=3	hA3=4	hA4=5	hA5=14
2012-09	58182.55	44358.75	-10702.35	-13103.88	-12256.82	-13428.61	-29537.26
2013-04	58181.50	44357.79	-10702.63	-13104.10	-12257.55	-13428.67	-29537.45
2013-08	58181.25	44357.85	-10701.89	-13104.30	-12257.16	-13428.65	-29537.34
2013-10	58182.54	44358.52	-10702.25	-13104.10	-12256.47	-13428.71	-29537.40
2014-04	58181.11	44358.19	-10701.69	-13103.89	-12256.16	-13428.47	-29537.60
2015-05	58181.90	44358.81	-10701.91	-13105.05	-12256.51	-13428.91	-29536.64
2015-09	58182.59	44358.22	-10702.27	-13105.64	-12255.77	-13428.89	-29537.21

4.3 Данные GPS измерений на детальных площадках

Обработка GPS данных примерно на год задерживает получение векторов скорости и координат с момента измерений. С июня 2012 г по декабрь 2014 г нами получено 10 циклов GPS измерений по площадкам POLIGON и KENTOR. Для площадки ALMALY за это же время выбрано такое же количество соответствующих по времени измерений как по площадке KENTOR. В прошлогоднем отчете уже упоминалось о неустойчивой сходимости дальностей БЛ по линейно-угловым и GPS измерениям. В одних случаях БЛ по двум методам имеют расхождения в первые миллиметры, что даже очень не плохо, а в других случаях по GPS данным дальности могут быть систематически завышены до 35-52 мм. В обработке текущего года возникла та же ситуация, которая отрицательно повлияла как на качество векторов скорости, так и временных рядов координат (ВРК). В связи с этим был проведен детальный анализ ВРК, условий измерений и расчетов. Выяснено, что для отдельных измерений в автоматическом режиме были внесены стандартные высоты антенн, которые не соответствовали реально установленным. В "ручном" режиме эти несоответствия были выявлены, исправлены и пересчитаны данные для временных рядов.

Данные GPS наблюдений на площадке POLIGON.

На каждом из 6 реперов (тумб) площадки POLIGON возможно из одной позиции проводить линейно-угловые и GPS измерения (рис. 4.1-1). 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. Для пунктов POLY и IP02 по техническим причинам на сегодня доступны данные только по 6 кампаниям. Для остальных пунктов площадки получены координаты по 10 циклам измерений. В связи с ошибками в высоте антенн полученные из GAMIT/GLOBK векторы скорости малоприспособны для дальнейшего анализа. Однако исправленные ВРК и на их основе рассчитанные скорости могут быть полезны для понимания кинематики движений в районе площадки.

Корректировка высот осуществлялась в геодезических координатах LLA (долгота, широта, высота), которые преобразовывались в геоцентрические картезианские – XYZ. Затем все доступные для площадки позиции реперов переведены в локальные топоцентрические – NEH, с началом координат в средней позиции одного из пунктов. При необходимости начало координат можно установить в любой точке пространства, но для удобства был выбран репер площадки IP05. После этого уже можно оперировать ВРК в привычных направлениях север-восток-вверх картезианской системы.

Для того чтобы исключить влияние удаленной системы отсчета (CO) EURA-2008 из локальных топоцентрических координат NEH необходимо выяснить степень коррелированности во временных вариациях координат для пунктов площадки (табл. 4.3.1).

Таблица 4.3.1 — Средние парные коэффициенты корреляции по временным рядам координат NEH (EURA-2008) для пунктов площадки POLYGON.

Пункты	POLY	POL3	IP02	IP03	IP04	IP05	Среднее
POLY	1	0.29	0.33	0.31	0.18	0.34	0.29
POL3	0.29	1	0.83	0.76	0.60	0.62	0.62
IP02	0.33	0.83	1	0.81	0.87	0.67	0.70
IP03	0.31	0.76	0.81	1	0.74	0.78	0.68
IP04	0.18	0.60	0.87	0.74	1	0.46	0.57
IP05	0.34	0.62	0.67	0.78	0.46	1	0.57

Из данных таблицы следует, что только пункт POLY имеет значимые отличия по вариациям своего положения, позиции остальных пунктов в среднем меняются синхронно на $\geq 57\%$ в CO EURA-2008. Для стабилизации координат пунктов площадки проверенным способом является использование как минимум 3-х пунктов [Кузиков, Образцова, 2011]. Однако этот метод более трудоемкий и менее показательный при обозначении позиции наблюдателя CO. В данном случае на площадке POLYGON CO и начало координат были совмещены с данными о пункте IP03, т.к. он наиболее представительный по временному ряду и имеет высокий средний коэффициент корреляции (КК) с другими пунктами (табл. 4.3.1). Другими словами нами допускается, что объем земной коры в радиусе первых метров вокруг тумбы IP03 является жестким телом с привязанной ему ортогональной системой координат, ориентированной 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}. При этом меняются не только величины одноименных координат, но и соотношения между позициями как одного пункта, так и между пунктами в разные моменты измерений. Естественным образом позиция пункта

IP03 будет в начале координат во все моменты измерений, т.е. координаты будут всегда равны нулю. Такая стабилизация дала эффект сокращения среднего интервала вариаций ВРК на ~18% с 9.27 до 7.60 мм. При этом, чем больше была корреляция координатных рядов пунктов с пунктов IP03 (табл. 4.3.1), тем больше сокращение интервала вариаций координат. Так для POLY (с низкой корреляцией) проявился обратный эффект увеличения среднего интервала вариаций ВРК с 8.83 до 10.11 мм. Пример различия ВРК и векторов одного пункта в СО EURA-2008 и относительно пункта IP03 приведен на рисунке 4.3-1.

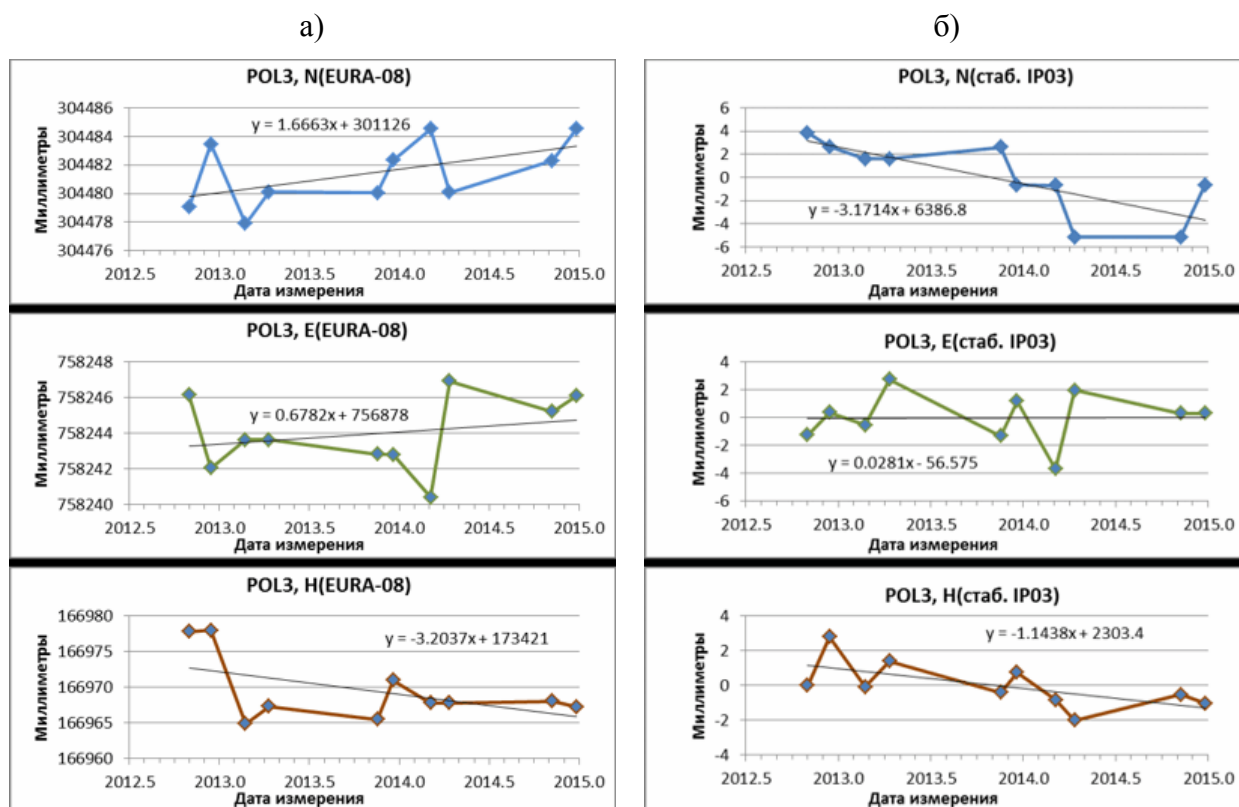


Рисунок 4.3-1 — Различие временных рядов координат и векторов скорости для GPS пункта POL3: а) – в системе отсчета EURA-2008; б) – в локальной системе отсчета и стабилизацией относительно пункта IP03.

Необходимо отличать описанную выше процедуру преобразования координат и на их основе расчета векторов скорости, от простого геометрического преобразования векторов из одной СО в другую (без участия координатных рядов). Пример отличия таких векторных систем и возможность их сравнения отражена в таблице 4.3.2.

Таблица 4.3.2 — Векторы скорости для пунктов площадки POLIGON при разных системах отсчета.

Система отсчета	CO EURA, мм/г			Векторный пересчет из CO EURA в CO IP03, мм/г			Стабилизация координат в CO IP03, мм/г		
Пункт	V1n	V1e	V1h	V2n	V2e	V2h	V3n	V3e	V3h
POLY	4.11	3.07	3.97	-0.73	2.42	6.03	-1.95	4.29	7.83
POL3	1.67	0.68	-3.20	-3.17	0.03	-1.14	-3.17	0.03	-1.14
IP02	2.81	-2.98	-2.06	-2.03	-3.63	0.00	-1.14	-2.71	3.44
IP03	4.84	0.65	-2.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
IP04	4.58	-2.17	-2.65	-0.26	-2.82	-0.59	-0.26	-2.82	-0.59
IP05	2.63	0.84	0.68	-2.21	0.19	2.74	-2.20	0.19	2.74

Здесь приведены значения трех наборов векторов для пунктов площадки POLIGON.

Первая векторная система (V1n, V1e, V1h) построена на основе расчетов программы GAMIT/GLOBK в CO EURA-2008. Второй набор векторов (V2n, V2e, V2h) получен из первого вычитанием значений вектора скорости пункта IP03, тем самым наблюдатель перемещается в данный пункт и видит, как относительно него движутся остальные пункты. Наконец, третья векторная система получена в результате описанных выше преобразований ВРК. Последние два набора векторов есть смысл сравнивать между собой, т.к. они опираются на одни и те же пункты, и системы их векторных координат идентичны. Максимальные отличия (до 1.87 мм/год) здесь приходится на пункты POLY и IP02, в среднем одноименные векторы в разных СО различаются на 0.56 мм/год. Более наглядной является третья векторная система (V3n, V3e, V3h), которая отражает векторы движений пунктов площадки относительно одного из реперов площадки (рис. 4.3-2).

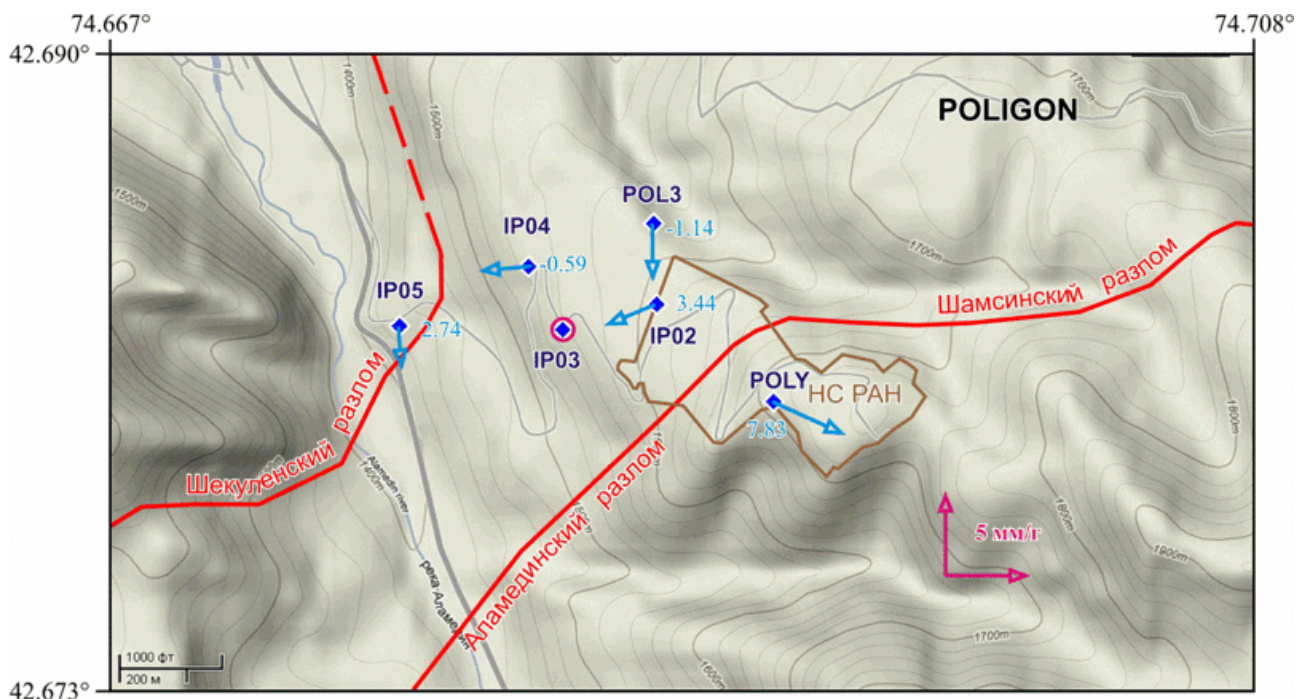


Рисунок 4.3-2 — Векторы скорости для GPS реперов площадки POLIGON, стабилизированные относительно пункта IP03, измерения за 2012-2014 гг. Числа – вертикальная скорость пункта, мм/год.

На основе представленных векторов скорости каких-либо закономерностей в движении реперов не установлено. Обращает на себя внимание относительно большая горизонтальная компонента скорости 4.71 мм/год в ЮВ направлении и вертикальная компонента (7.83 мм/год) для POLY. Поскольку интервал измерений еще не перекрывает 3-летний рубеж, у некоторых пунктов меньшее количество измерений, исправления высот не вошли в единое решение всех векторов в GAMIT/GLOBK, то делать какие-либо выводы по векторам скорости для площадки полигон пока преждевременно.

Данные GPS наблюдений на площадке KENTOR.

В состав площадки KENTOR входит 6 реперов (тумб) комплексного геодезического наблюдения, из них для GPS измерений используются только 4 пункта: IK02, IK03, IK05 и IK06. Для всех пунктов площадки получены координаты по 10 циклам измерений. Но также как и на площадке POLIGON, здесь часть измерений у всех пунктов прошла в обработку единого решения с ошибками в высоте антенн. Это обстоятельство также помешало здесь получить качественные векторы скорости и ВРК для дальнейшего анализа.

На площадке KENTOR также были скорректированы высоты антенн и для всех доступных ВРК рассчитаны локальные топоцентрические координаты NEH. На их основе выяснена степень коррелированности ВРК для пунктов площадки. По северной компоненте все пункты имеют высокие положительные значения КК от 0.82 до 0.93, в среднем – 0.88. По восточной координате КК варьирует от -0.19 до 0.84, среднее – 0.1. По вертикали КК варьирует от 0.56 до 0.98, в среднем – 0.78. Средние значения КК по всем координатам для парных сочетаний пунктов площадки сведены в таблице 4.3.3.

Таблица 4.3.3 — Средние парные коэффициенты корреляции по временным рядам координат NEH (EURA-2008) для пунктов площадки KENTOR.

Пункты	IK02	IK03	IK05	IK06	Среднее
IK02		0.66	0.52	0.67	0.61
IK03	0.66		0.56	0.53	0.58
IK05	0.52	0.56		0.84	0.64
IK06	0.67	0.53	0.84		0.68

Из данных таблицы следует, что в среднем все пункты площадки имеют сходные вариации движений в СО EURA-2008, наибольшая синхронность отмечается у пунктов IK05 и IK06. В качестве основы для стабилизации выберем пункт IK05, его средний КК занимает вторую позицию, но его положение на самом южном геологическом блоке позволит проще представить схему движений на всей площадке. В результате стабилизации ВРК всех пунктов площадки на основе данных репера IK05 произошло сокращение среднего

интервала вариаций координат на ~40% с 12.37 до 7.27 мм. Полученные итоговые векторы скорости для пунктов площадки KENTOR приведены в таблице 4.3.4.

Таблица 4.3.4 — Векторы скорости (мм/год) для пунктов площадки KENTOR в системе отсчета IK05.

Пункт	V _n	V _e	V _h
IK02	-1.20	-2.62	0.75
IK03	-1.74	-1.60	1.66
IK05	0.00	0.00	0.00
IK06	-1.50	-0.49	0.26

Поместив наблюдателя в пункт IK05 можно анализировать, как относительно него движутся остальные пункты площадки (рис. 4.3-3). Из представленных векторов скорости следует, что уровень относительных смещений реперов площадки KENTOR не большой как в плане < 3 мм/год, так и по вертикали < 2 мм/год. Причем самая большая разница между векторами приходится на соседние пункты IK05 и IK02. Кроме того группа пунктов IK02, IK03 и IK06 движется однотипно в 3–мерном пространстве относительно IK05. Если устойчивость такой кинематики движений сохранится с течением времени, то следует рассмотреть вопрос о смещении линии разлома к югу от пункта IK02. И у Шамсинского взброса будет зафиксирована лево-сдвиговая составляющая, которая превышает даже взбросовую компоненту поперечного северного укорочения.

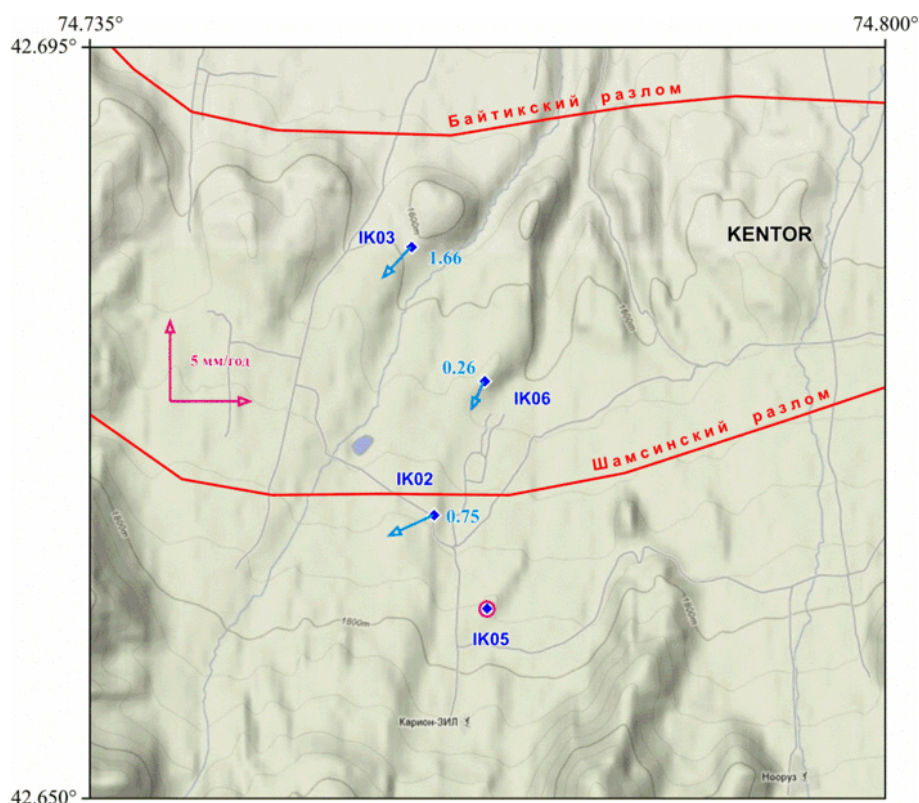


Рисунок 4.3-3 — Векторы скорости для GPS реперов площадки KENTOR, стабилизированные относительно пункта IK0, измерения за 2012-2014 гг.

Числа – вертикальная скорость пункта, мм/год.

Данные GPS наблюдений на площадке ALMALY.

На площадке ALMALY установлены 4 перманентные GPS станции: IAT1, IAT3, IAT5 и IATA. Чтобы выдержать временной интервал и частоту измерений для всех геодезических площадок, здесь за сентябрь 2012 г – декабрь 2014 г были также составлены ВРК для 10 циклов измерений. Процедура обработки данных была аналогична случаям предыдущих площадок. На основе топоцентрических координат NEH получена усредненная корреляционная матрица для пунктов площадки (табл. 4.3.5).

Таблица 4.3.5 — Средние парные коэффициенты корреляции по временным рядам координат NEH (EURA-2008) для пунктов площадки ALMALY.

Пункты	IAT1	IAT3	IAT5	IATA	Среднее
IAT1	1	0.40	0.77	0.75	0.64
IAT3	0.40	1	0.35	0.41	0.39
IAT5	0.77	0.35	1	0.89	0.67
IATA	0.75	0.41	0.89	1	0.68

Наибольшая синхронность движений отмечается у пунктов IAT5 и IATA. Менее всего взаимосвязан с другими репер IAT3, это отмечалось ранее по данным ЛУИ. В качестве основы для стабилизации выбран пункт IATA. В результате стабилизации ВРК по реперу IATA произошло сокращение среднего интервала вариаций координат на ~26% с 16.00 до 11.75 мм. Итоговые векторы скорости для пунктов площадки ALMALY приведены в таблице 4.3.6.

Таблица 4.3.6 — Векторы скорости (мм/год) для пунктов площадки ALMALY в системе отсчета IATA.

Пункт	Vn	Ve	Vh
IAT1	-2.89	-0.40	-6.05
IAT3	-1.46	-0.12	-8.65
IAT5	-0.64	0.69	-0.46
IATA	0	0	0

С позиции пункта IATA наблюдать видит следующие смещения по площадке (рис. 4.3-4).

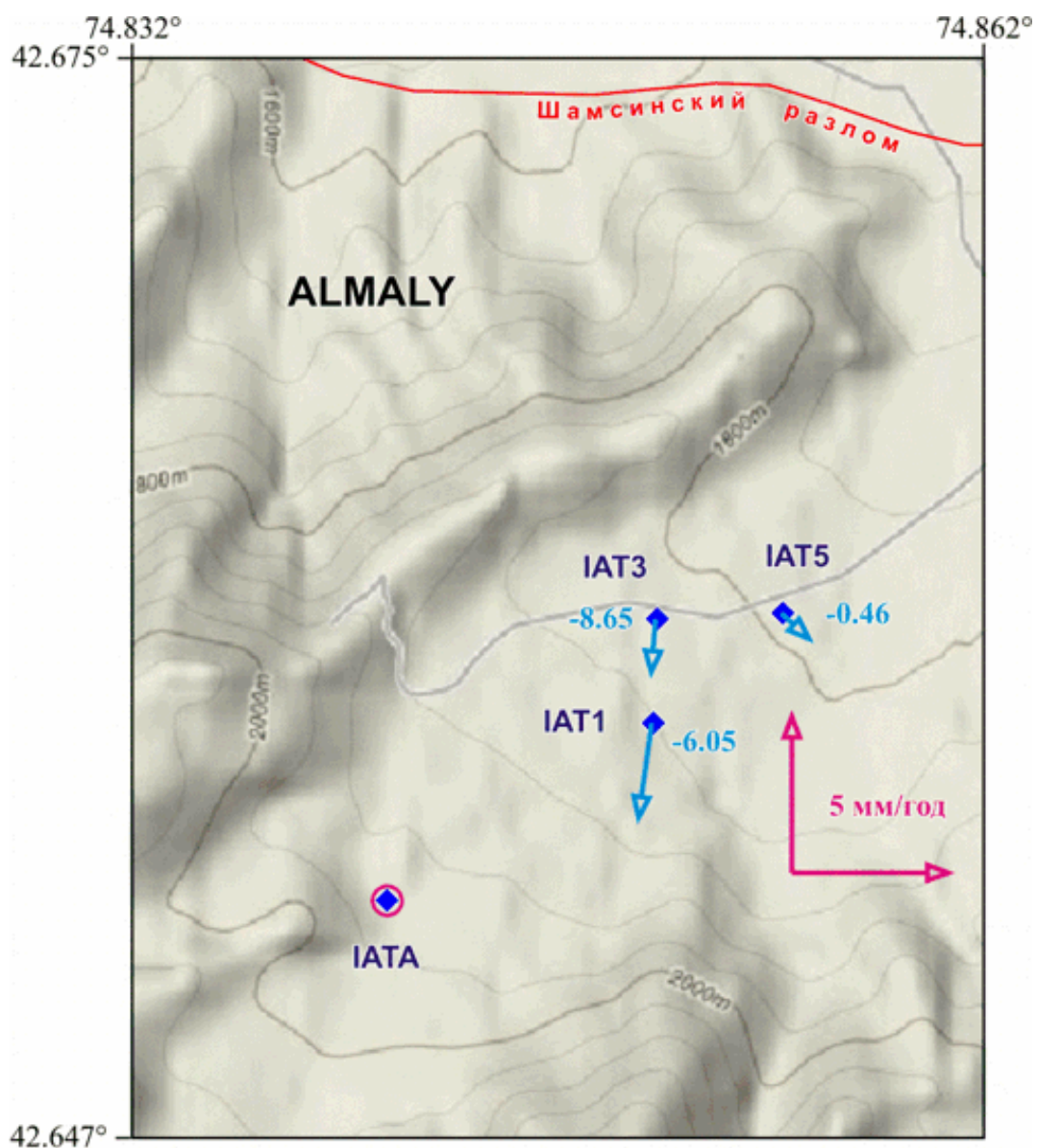


Рисунок 4.3-4 — Векторы скорости для GPS реперов площадки ALMALY, стабилизированные относительно пункта IATA, измерения за 2012-2014 гг.
Числа – вертикальная скорость пункта, мм/год.

Уровень относительных смещений реперов в плане < 3 мм/год с преобладающей южной направленностью движений. По вертикали отмечаются отрицательные движения до 9 мм/год.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уже более 20 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. Это позволило установить общую согласованность в распределении деформации в плане приповерхностного (GPS данные) и нижележащего (сейсмоактивного, глубины 5-20 км) горизонтов земной коры. И в тоже время была зафиксирована локальная аномалия по GPS данным, которая не согласуется с распределением глубинной деформации, что позволяет в районе гор Джумгал-Тоо выделить блок земной коры (глубина до 5 км) с повышенными градиентами скорости деформации. Здесь фиксируются пониженные значения скорости приповерхностной дилатансии и повышенные скорости деформации в сейсмоактивном слое земной коры. Выявленная дисгармония в распределении приповерхностной и глубинной деформации указывает на энергонасыщенный и потенциально опасный объем земной коры, с точки зрения проявления сейсмических событий и активности разрывных нарушений.

Не меньший 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 Беленович Т.Я. Сейсмотектоническая деформация территории Чуйской впадины и ее горного обрамления / Т.Я. Беленович, Н.Х. Багманова // Изв. АН Кирг. ССР. Физ.-тех. и матем. науки. – 1988. – №3. – С.75-80.
- 2 Беленович Т.Я. Сейсмотектоническая деформация земной коры Иссык-Кульской впадины и ее горного обрамления / Т.Я. Беленович, Н.Х. Багманова // Детальное сейсмическое районирование Иссык-Кульской впадины. – Бишкек: Илим. – 1993. – С.87-93.
- 3 Zubovich A.V. Изучение поля скоростей современных движений земной коры Центрального Тянь-Шаня методами космической геодезии: Дисс. канд. физ.-мат. наук / Zubovich Александр Владимирович. – Москва: ИФЗ РАН, 2001. – 95с.
- 4 Zubovich A.V. Современная кинематика Тарим–Тянь-Шань–Алтайского региона Центральной Азии (по данным GPS измерений) / А.В. Zubovich, Р.Т. Бейсенбаев, В. Сяочан [и др.] // Физика Земли, 2004. – № 9. – С. 31-40.
- 5 Кальметьева З.А. Поле напряжений Кыргызского Тянь-Шаня / З.А. Кальметьева, В.В. Гребенникова, Е.В. Мусиенко // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов / Отв. ред. Гольдин С.В., Леонов Ю.Г. – Бишкек: Научная станция РАН. – 2003. – С.233-240.
- 6 Костюк А.Д. Деформационные изменения земной коры Северного Тянь-Шаня по данным космической геодезии / А.Д. Костюк // Вестник КРСУ. – 2008. – Т.8. – №3. – С.140-144.
- 7 Крестников В.Н. Напряженное состояние земной коры Центрального и Северного Тянь-Шаня / В.Н. Крестников [и др.] // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1987. – № 3. – С.13-30.
- 8 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.
- 9 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.

10 Кузиков С.И. Точность воспроизведения заданных смещений GPS антенны / С.И. Кузиков, Т.С. Образцова // Вестник КРСУ. – 2011. – Т. 11. – № 4. – С. 129-134.

11 Курскеев А.К. Сейсмологическая опасность орогенов Казахстана / А.К. Курскеев, О.М. Белослюдцев, А.Р. Жданович [и др.]. – Алматы: Эверо. – 2004. – 294 с.

12 Лопатина Т.Я. Некоторые сведения о механизме очагов землетрясений Чуйской впадины и ее горного обрамления / Т.Я. Лопатина // Опыт комплексного сейсмического районирования на примере Чуйской впадины. – Фрунзе: Илим. – 1975. – С.73-84.

13 Лопатина Т.А. Механизмы очагов слабых землетрясений, произошедших в 1967-1973 гг. в Чуйской впадине и ее горном обрамлении / Т.Я. Лопатина, Т.Я. Серебрянская // Строение земной коры и сейсмичность Северного Тянь-Шаня. – Фрунзе: Илим. – 1978. – С.111-125.

14 Мансуров А.Н. Математическая модель и методика расчета поля скорости деформации земной коры по данным GPS наблюдений / А.Н. Мансуров // Проблемы автоматизации и управления. – 2012. – №2.

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. – 2015. – Т.15. – № 6.

16 Миди Б.Дж. Современное распределение деформации в Западном Тянь-Шане по блоковым моделям, основанным на геодезических данных / Б.Дж. Миди, Б.Х. Хагер // Геология и геофизика. – 2001. – Т.42. – № 10. – С.1622–1633.

17 Ризниченко Ю. В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент / Ю. В. Ризниченко // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука. – 1976. – С.9-27.

18 Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии / Ю. В. Ризниченко. – М.: Наука. – 1985. – 408 с.

19 Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Отв. ред. В.И. Макаров. – М.: Научный мир. – 2005. – 400 с.

20 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.

21 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.

22 Сычева Н.А. Сейсмотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) / Н.А. Сычева [и др.] // Физика Земли. – 2005. – № 11. – С.62-78.

23 Юдахин Ф.Н. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня / Ф.Н. Юдахин. – Фрунзе: Илим. – 1983. – 246 с.

24 Юдахин Ф.Н. Современная динамика земной коры Тянь-Шаня и физические процессы в очагах землетрясений / Ф.Н. Юдахин, Т.Я. Беленович // Изв. АН Кирг ССР. Физ.-тех. и матем. науки. – 1989. – №1. – С.101-108.

25 Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций / С.Л. Юнга. – М.: Наука. – 1990. – 191 с.

26 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.

27 Gurtner W. RINEX: The Receiver-Independent Exchange Format / W. Gurtner // GPS World. – 1994. – Vol. 5, N 7.

28 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>

29 Hamburger M.W. Results from a GPS geodynamic network in the Tien Shan mountains, Kirgyzstan and Kazakhstan. CIS / M.W. Hamburger, X.D. Song, B.H. Hager [et al.] // Europ. Geophys. Soc. Meeting – Grenoble, 1994. – P. 52-54.

30 Herring T.A. Introduction to GAMIT/GLOBK : Release 10.4 / T.A. Herring, B.W. King, S.C. McClusky. – MIT, 2010a. – 48 p.

31 Herring T.A. GAMIT : Reference manual : GPS analysis at MIT : Release 10.4 / T.A. Herring, B.W. King, S.C. McClusky. – MIT, 2010b. – 170 p.

32 Herring T.A. GLOBK : Reference manual : Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.4 / T.A. Herring, B.W. King, S.C. McClusky. – MIT, 2010c. – 91 p.

- 33 Hofmann-Wellenhof B. GPS Theory and Practice / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger – 4-th rev. ed. – Wien: Springer-Verlag, 1997. – 390 p.
- 34 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.
- 35 Leick A. GPS satellite surveying / A. Leick – 2-nd ed. – New York: J. Wiley & Sons, 1995. – 560 p.
- 36 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.
- 37 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.
- 38 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.
- 39 Snoke J.A. A program for focal mechanism determination by combined use of Polarity and SV-P amplitude ratio data / J.A. Snoke [et al.] // Earthquake Notes. – 1984. – No.3. – P.15.
- 40 Snoke J.A. Clyde and the Gopher: a preliminary analysis of the 12 May 1990 Sakhalin Island event / J.A. Snoke // Seism. Res. Letters. – 1990. – No. 61. – P.161.
- 41 Snoke J.A. Earthquake Mechanisms / J.A. Snoke // Encyclopedia of Geophysics. – 1989. – P.239-245.
- 42 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 .
- 43 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.