**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

**КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени К.И. Сатпаева**

А.В. ЗЕМЦОВА

ВЫСШАЯ ГЕОДЕЗИЯ

(Геодезические работы на геодинамических полигонах)

Рекомендовано Республиканским учебно-методическим объединением
в качестве учебного пособия

Алматы 2008

УДК 528. 33/37

З 555 **Земцова А.В.** Высшая геодезия (геодезические работы на геодинамических полигонах): Учеб. пособие. – Алматы: КазНТУ, 2008. – 98 с.

ISBN 978-601-228-009-8

Учебное пособие содержит материал, дополняющий курс высшей геодезии. В нем изложены основные сведения о методах определения современных движений земной поверхности. Рассмотрены характерные особенности проведения геодезических работ на геодинамических прогностических и техногенных полигонах, выполняемых для определения современных вертикальных и горизонтальных движений земной поверхности. Даны теоретические основы, а затем практические вопросы постановки различных видов высокоточных измерений и их математические обработки в плановых и высотных сетях на геодинамических полигонах. Особое внимание уделено современным методам определения вертикальных движений земной поверхности высокоточным цифровым нивелированием и горизонтальных движений методами GPS- измерений.

Предназначено для бакалавров, обучающихся по специальностям 050711 – «Геодезия и картография» и 050707 – «Горное дело», а также может быть полезно для бакалавров специальностей строительного и нефтегазового направлений.

Рецензенты: Т.П. Пентаев, КазГАСА, д-р.техн. наук, проф.
З.К. Куралбаев, АИЭиС, д-р.ф.-м. наук, проф.
Ж.О.Отарбаев, КазНТУ, д-р.техн. наук, проф.

Печатается по плану издания Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2008 г.

ISBN 978-601-228-009-8

© Земцова А.В.
© КазНТУ, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Динамика Земли, изменение ее фигуры и гравитационного поля во времени – это основной предмет, изучаемый в современной высшей геодезии. Динамика Земли проявляется в движениях земного полюса, неравномерностях ее вращения, в изменениях уровней морей и океанов, в движении литосферных плит, в вертикальных и горизонтальных движениях земной поверхности.

Исследование современных движений земной поверхности имеет большое практическое и научное значение. Проблема изучения современных движений земной поверхности в настоящее время становится делом государственной важности.

В Программе развития геодезии и картографии в Республике Казахстан, утвержденной постановлением Правительства Республики Казахстан № 1455 от 31.12. 2004 года, предусматривается создание геодинамических полигонов в Южно-Казахстанской, Жамбылской, Восточно-Казахстанской, Актюбинской, Атырауской, Западно-Казахстанской, Карагандинской и Мангистауской областях для изучения тектонических деформаций земной коры. Министерством энергетики и минеральных ресурсов РК определен список 30 месторождений углеводородов, на которых необходимо проведение геодинамического мониторинга на техногенных полигонах.

При проведении комплексных исследований с целью изучения тектонических движений, разработки методов поиска прогностических признаков подготовки крупных землетрясений, микросейсморайонирования, прогнозирования техногенных процессов и их последствий до свершения непредсказуемых техногенных явлений и катастроф, наряду с другими методами приобретают важнейшее значение высокоточные геодезические работы. Они позволяют с высокой точностью и частотой опроса проводить повторные наблюдения за местоположением пунктов плановых и высотных сетей, количественную обработку и анализ накопленных данных. Геодезические работы на геодинамических полигонах – это часть комплекса геодезических, геофизических исследований и имеют целью получение количественных характеристик стабильности взаимного положения точек земной поверхности во времени.

В связи с большим объемом строительства в различных по физико-географическим, геологическим и тектоническим условиям регионах страны требуют к себе внимания вопросы детального изучения и прогнозирования движений земной коры как одной из компонент, необходимых для адекватного сейсмического районирования областей, подлежащих застройке. Данные о современных движениях земной поверхности важны при проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений и ряда других проблем.

Пособие состоит из шести глав: геодинамические задачи геодезии, классификация геодинамических явлений; геодезические методы изучения современных движений земной поверхности; прогностические геодинамические по-

лигоны; современные геодезические технологии изучения опасных геодинамических процессов; техногенные полигоны; сейсмическое микрорайонирование.

Следуя программе курса, эти разделы построены по принципу: сообщаются общие сведения и теория вопроса, затем освещаются средства и методы ведения тех или иных исследований. Такой порядок изложения материала позволяет изучающему получить представление не только о каких-то частных задачах курса, но и понять основы конкретной науки.

В первой и второй главах приведены сведения о задачах геодезии, решающих вопросы изучения динамики Земли, проявляющейся в движениях земного полюса, неравномерностях ее вращения, в горизонтальных и вертикальных движениях земной поверхности и т.д. Дана классификация геодинамических явлений. Здесь также освещены геофизические, геологические, геохимические, геоморфологические и геодезические методы определения современных движений земной поверхности.

Содержание третьей, четвертой и пятой глав подчинено решению конкретных задач, имеющих место при определении современных движений земной поверхности на прогностических и техногенных геодинамических полигонах.

Рассмотрены цели и назначение прогностических и техногенных геодинамических полигонов, основные геодезические построения на них территории, угловые и линейные измерения в геодезических сетях на геодинамических полигонах, методика выполнения нивелирования на ГДП, математическая обработка повторных наблюдений. При этом учитывалось то положение, что основы геодезической науки студенту уже хорошо известны и, что в последующем он перейдет к изучению большого курса – курса высшей геодезии.

В пятой главе рассмотрены вопросы определение современных движений земной поверхности с использованием спутниковых навигационных систем, общая структура и состав спутниковых навигационных систем, планирование и выполнение GPS- измерений.

В заключительной главе пособия освещены вопросы выполнения геодезических работ при сейсмическом микрорайонировании территории.

Курс Высшая геодезия (геодезические работы на геодинамических полигонах) тесно связан с другими дисциплинами, читаемыми бакалаврам инженерно-геодезической специальности, в частности с курсами: «Геодезия», «Теория математической обработки геодезических измерений».

1. ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ГЕОДЕЗИИ. КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Высшая геодезия, являясь составной частью науки геодезии, изучает геодинамические явления, связанные с планетарной эволюцией Земли. К геодинамическим задачам геодезии относятся: движение литосферных плит и земной коры, перемещения центра масс и оси вращения в теле Земли, изменение береговых линий и уровней морей и океанов, неравномерность вращения планеты, изменения фигуры и внешнего гравитационного поля Земли во времени изучаются как сложные взаимосвязанные явления, обусловленные изменением внутреннего строения Земли, лунно-солнечными приливными деформациями и собственным вращением Земли относительно своего центра масс.

В эру новых технологий все более возрастает интерес к планетарным и научно-прикладным задачам геодезии. Впервые возникает возможность ставить эксперименты и выполнять высокоточные работы в планетарном масштабе, проводить обширные астрономо-геодезические и гравиметрические измерения, надежно определяют фигуру и внешнее гравитационное поле Земли на каждую эпоху. Появилась практическая необходимость в создании планетарной геоцентрической геодезической системы координат, распространяемой на всю поверхность Земли, в построении математической модели земного притяжения, адекватной внешнему гравитационному полю Земли, в определении пространственного положения естественных и искусственных космических объектов на любой момент времени и с высокой точностью. Резко возросли требования практики к системе геодезических координат, фиксируемой пунктами астрономо-геодезической сети (АГС), к параметрам фигуры и внешнего гравитационного поля Земли. Поэтому геодезия стала планетарной и физической во всех областях своего приложения. При этом она представляет твердую, водную и воздушную оболочки Земли и Космос как единую динамическую систему, параметры которой непрерывно изменяются.

Динамика Земли, изменения ее фигуры и гравитационного поля во времени являются основным предметом, изучаемом в современной геодезии. При этом должно приниматься во внимание главное требование современных геодинамических исследований: построение и сохранение фундаментальной земной системы координат с точностью 10^{-10} (или 6 мм) на поверхности Земли.

Геодинамические явления многообразны и сложны для изучения, они объясняют планетарную эволюцию Земли и связь ее с космическими явлениями. Геодинамика является объектом изучения всех наук о Земле. Для правильного объяснения и прогноза геодинамических явлений необходимо иметь строгую теорию геодинамики и выполнять геодезические и геофизические работы в планетарном, континентальном и региональном масштабах.

Современная высшая геодезия характеризуется интенсивным развитием новых технологий на основе применения прецизионных, высокопроизводительных и оперативных астрономо-геодезических измерительных средств, новых теорий и эффективных методов систематизации и обработки информации,

отражающей глобальные и региональные метрические свойства Земли. Современные методы изучения фигуры и внешнего гравитационного поля Земли связаны с использованием наблюдений космических летательных аппаратов (КЛА), спутниковой навигацией.

Динамика Земли проявляется в движениях земного полюса и неравномерностях ее вращения. Изменение положения оси вращения Земли в пространстве очень велико. Это изменение (ось перемещается, описывая коническую поверхность) имеет вековую составляющую – прецессию, открытую Гиппархом во II в. до н. э.. Ось вращения Земли под действием сил тяготения Луны и Солнца на экваториальный избыток (как известно, Земля сплюснута и, таким образом, у экватора расположено больше вещества, чем у полюсов) также медленно вращается. Период прецессии очень велик. Земная ось снова примет свое теперешнее направление только через 26 тыс. лет.

Из-за прецессии меняется положение небесного экватора и полюса мира. Наряду с движением оси вращения Земли по конусу, наблюдаются небольшие ее колебания названные нутацией. Прецессия и нутация изменяют ориентировку оси вращения Земли в пространстве.

Новые возможности в изучении движения полюсов открывают наблюдения с искусственных спутников земли (ИСЗ) и других космических объектов. Во всех уравнениях движения ИСЗ участвует матрица полюса. Координаты полюса как систематическую составляющую можно отыскивать из лазерных, доплеровских и фотографических наблюдений ИСЗ. Наиболее оперативную и объемную информацию дают доплеровские наблюдения ИСЗ.

Задаваясь геоцентрическими координатами обсерваторий слежения на определенную эпоху и накапливая наблюдения лазерных отражателей Луны, космических летательных аппаратов (КЛА) и радиоинтерферометрии, можно фиксировать положение мгновенной оси вращения Земли на любую эпоху.

Совместное определение широты и долготы на станциях МСДП, наблюдения с ИСЗ и других космических объектов, позволяют решить задачу о полюсе Земли настолько полно, что полученные при этом данные будут удовлетворять самым высоким требованиям фундаментальной астрометрии, геодезии, геофизики и прогнозирования ряда планетарных процессов.

Выявление движений земной поверхности на современном этапе – очень трудная задача. Интенсивность тектонических движений земной коры обычно измеряется миллиметрами в год, и выделить их среди других процессов, происходящих как на поверхности, так и в недрах Земли, можно лишь применяя различные инструментальные методы и проводя высокоточные длительные измерения. Современные движения выявляются путем применения разнообразных методов: геологических, геоморфологических, геофизических, геохимических, астрономических, геодезических, вследствие чего их изучение неизбежно приобретает комплексный характер. Для изучения современных движений земной поверхности используются также спутниковые методы.

Для определения медленных горизонтальных движений земной поверхности на значительных площадях применяются астрономические методы, спут-

никовые наблюдения, метод лазерной локации и радиоинтерференционный метод.

Астрономическими методами определяют горизонтальные перемещения континентов (движение литосферных плит). Для этого выполняются международные долготные определения. О больших горизонтальных перемещениях континентов, сопровождающихся деформациями, говорил еще М.В. Ломоносов, позднее на них указывали Верштейн (1880 г.), Ф. Сакко (1895 г.), Е.В. Быханов (1895 г.), Ф. Тэйлор (1910 г.). Особенно подробно разработал эту теорию А. Вегенер (1912, 1920 г.г.). А. Вегенер – немецкий метеоролог и исследователь Гренландии предполагал, что когда-то вся теперешняя суша составляла единый материк Пангею. Под действием каких-то сил, возможно связанных с вращением Земли, примерно 200 млн. лет назад Пангея раскололась на несколько частей. Ее осколки – теперешние материки – разошлись в разные стороны, и начался их дрейф. Мы наблюдаем доныне продолжающийся крайне медленный дрейф континентов. В новейшей редакции гипотеза Вегенера нашла отражение в концепции тектоники литосферных плит [1].

Подтверждением данной гипотезы и наличия дрейфа континентов являются не только чисто геологические, палеоклиматические, биогеографические и другие данные и построения, но и точные повторные определения географических координат одних и тех же точек земной поверхности, расположенных на разных континентах астрономическими методами.

Для обоснованных заключений о дрейфе материков в последнее время разрабатываются новые методы космической геодезии. К ним относятся наблюдения с искусственных спутников Земли (ИСЗ). Развитие квантовой радиофизики и создание лазеров открыли возможности высокоточных измерений методом лазерной локации. Этот метод позволяет непосредственно измерить расстояние между точками, одна из которых находится на поверхности Земли, а другая – на поверхности Луны.

Лазерно-локационные измерения расстояний до уголковых светоотражателей, помещенных в различных точках Луны, проводимые в России и США, уже в настоящее время позволили определить расстояния (хорду) между обсерваторией Макдональда и Крымской обсерваторией с точностью до 2 м. При лазерной локации спутников получают информацию о движении полюсов, скорости вращения Земли, выявляют движения и деформацию плит, изучают гравитационное поле Земли.

В последнее время для определения СДЗП используется и метод Радиоинтерферометрии со Сверхдлинной Базой (РСДБ). Впервые идея РСДБ была предложена советскими учеными Н.С. Кардашевым, Л.И. Матвеенко, Г.Б. Шоломичким в 1963 г. Радиоинтерферометр состоит из двух радиотелескопов, разнесенных на сотни или тысячи километров, и наблюдающих один и тот же квазар – внегалактический источник шумового радиоизлучения. Квазары находятся на расстоянии от Земли в десятки и сотни миллионов световых лет, т. е. бесконечно далеки, поэтому приходящие от квазара волны имеют идеально плоский фронт, а поступающие на радиотелескопы сигналы приходят по строго

параллельным путям. Эти сигналы идентичны, но приходят на радиотелескопы с некоторой временной задержкой один относительно другого. Задержка сигнала обусловлена разностью расстояний от радиотелескопа до квазара и зависит от длины вектора базы (расстояния между радиотелескопами), угла между базой и направлением на квазар. Корреляционная обработка сигналов позволяет с большой точностью определить разность времени прихода одного и того же фронта волны в разные радиотелескопы. Метод РСДБ позволяет определить длину вектора базы с ошибкой 2–3 см и направление на квазар с точностью до 0.001. Высокая точность определения длины базы дает возможность контролировать изменение формы Земли и горизонтальные перемещения блоков (плит) Земли. При изучении движения небольших участков (20–100 км) возможна фиксация вертикальных и горизонтальных движений. С помощью радиоинтерферометрических наблюдений было выполнено определение годовых изменений длин хорд в глобальной радиоинтерферометрической сети из 88 пунктов, расположенных в Северной Америке, Евразии, Африке и Австралии.

Исследование геодинамических процессов, проистекающих в верхней части земной коры и имеющих как естественную, так и техногенную природу, представляет большой интерес для развития наук о Земле: геодезии, геофизики, геологии, геотектоники и т. п. Изучение современных движений земной поверхности (СДЗП) служит для решения практических задач, связанных с градостроительством, строительством уникальных сооружений, при поиске и разработке полезных ископаемых.

В общем случае смещение земной поверхности является результатом проявления и взаимодействия различных экзогенных и эндогенных процессов, действующих как в земной коре, так и под ней. По масштабам проявления на земной поверхности эти процессы изменяются от сугубо локальных до планетарных. Время их действия от мгновений до сотен тысяч и миллионов лет.

Каждая из форм проявления геодинамических процессов способна произвести серьезные нарушения жилых и промышленных объектов, в том числе экологически опасных, таких как атомные и тепловые электростанции, гидротехнические сооружения, магистральные продуктопроводы, химические предприятия.

Современные движения земной поверхности являются составной частью окружающей среды, и на поверхности земного шара не найдется ни одной точки, полностью от них избавленной. Наиболее контрастные СДЗП присущи современно активным тектоническим областям: активизированным материковым платформам, рифтовым зонам, срединно-океаническим хребтам, границам столкновения литосферных плит и т. д. [2].

Высшим проявлением СДЗП в этих районах выступают тектонические землетрясения. Причиной землетрясения являются значительные деформации земных слоев. Деформационные предвестники землетрясений могут быть выявлены по данным наблюдений за медленными движениями земной

поверхности. Познав закономерности развития медленных СДЗП, можно вплотную приблизиться к проблеме предсказания землетрясений.

В связи с расширением техногенной деятельности человека на поверхности земли, стали ощутимыми локальные явления, связанные с этой деятельностью (их называют техногенными явлениями). Одним из результатов все более нарастающего потребления минерально-сырьевых ресурсов человеком стало глобальное изменение экологической и геодинамической безопасности природной среды. Известно, что интенсивная добыча полезных ископаемых приводит к увеличению нагрузки на недра, и, как следствие, к созданию условий для возникновения техногенных землетрясений.

Установлено, что земная кора и вся поверхность Земли испытывает сложные, разнообразные колебания [3].

В понятие « современных движений » – входят три основные группы (типа) движений:

1. Быстрые (сейсмические) колебания – толчки различной силы и длительности, которые наиболее ярко проявляются в деформациях земной коры и горных пород. Особенно велико значение СДЗП в сейсмических районах, где деформации земной коры – поднятие одних ее блоков и опускание других – максимальны. В ослабленных, тектоническими нарушениями, участках деформации в течение короткого времени могут достигать величин предельных для целостности массива горных пород, слагающих земную кору.

2. Сложные короткопериодические движения, связанные с воздействием космических тел (Луны, Солнца), а также с изменением температурных, барических и гидротермических условий. Луна притягивает к себе твердую и различные части водной оболочки Земли. Водная оболочка вытягивается в направлении Луны. Внутри этой « водяной капли » и само твердое тело Земли движется на встречу Луне. Солнечные приливы вдвое слабее лунных, но вполне ощутимы. Впервые твердые приливы были замечены в начале XX в. Подчиняясь влиянию Луны и Солнца, Земля пульсирует.

3. Медленные или вековые движения отдельных участков земной коры, развивающиеся на протяжении, по крайней мере, нескольких столетий. Эти фоновые суммирующие (результирующие) движения наиболее полно отражают общую тенденцию современной геодинамики. Современные медленные движения земной поверхности имеют вертикальные и горизонтальные составляющие, скорости которых различны и зависят, главным образом, от тектонического типа региона, строения и местоположения участка земной коры.

На территории Республики Казахстан угрозе разрушительных землетрясений постоянно подвержены Алматинская, Восточно-Казахстанская, Жамбылская, Южно-Казахстанская области и г. Алматы.

По данным Института сейсмологии южные, восточные и юго-восточные регионы страны после длительного сейсмического затишья вступили в период активизации сейсмических процессов с возможным возникновением сильных разрушительных землетрясений. Треть территории страны является сейсмоопасной, где расположено свыше 400 городов и населенных пунктов, сосредо-

точено 40 % промышленного потенциала и проживает половина населения страны. Регион Северного Тянь-Шаня, куда входит территория Алматинской области и г. Алматы, является одним из наиболее сейсмоопасных во всей Центральной Азии. За период более 100 лет здесь произошло около десятка разрушительных землетрясений, 2 из которых Чиликское 1889 г. и Кеминское 1911 г. имели магнитуду более 8 баллов и вошли в ранг мировых сейсмических катастроф [4].

Исследования по прогнозу землетрясений в Казахстане начались со второй половины 70-х годов XX в. созданием экспериментальной базы Алматинского прогностического полигона. В период с 1981 г. по 1980 г. была начата организация, проведение и наблюдения за вариациями геофизических полей, деформацией земной коры, сейсмическим режимом, газохимическим составом подземных вод. Результатом выполненных работ было создание базы данных, в которой сосредоточены наблюдения за геофизическими полями, газохимическим составом подземных вод, наклонами и деформациями земной коры продолжительностью в 20–30 лет. Эти данные служат основой для разработки методики комплексного прогнозирования землетрясений.

В последние годы произошли 5–6 бальные землетрясения в Атырауской, Западно-Казахстанской и Карагандинской областях, 7–бальное Зайсанское землетрясение. В Западном Казахстане происходят интенсивные геодинамические процессы. Ситуация усугубляется тем, что здесь осуществляется добыча углеводородного сырья, которая в ряде случаев может привести к достаточно интенсивным техногенным землетрясениям.

Поэтому проблемы прогноза землетрясений и снижения ущерба от этих катастроф и вызываемых ими вторичных геологических и техногенных факторов, имеют жизненно важное значение для обеспечения безопасности населения и объектов. Полученные количественные характеристики деформаций могут быть использованы при проектировании гидротехнических и других инженерных систем и сооружений, необходимых для нужд экономики страны, где нужны знания об устойчивости во времени участков земной поверхности.

2. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Наиболее распространенным методом изучения движений земной коры, дающим количественные характеристики её смещений, являются геодезические методы. Геодезические методы изучения СДЗП дают наиболее полную и объективную информацию, позволяющую не только фиксировать происходящие процессы, но и прогнозировать их [5]. Геодезические методы применяются в отличие от астрономических для выявления горизонтальных и вертикальных смещений отдельных участков земной поверхности. Основным методом определения современных горизонтальных движений земной поверхности (СГДЗП) является построение линейно - угловой сети и траверсов полигонометрии. Измерения в линейно - угловых сетях выполняют с точностью триангуляции, трилатерации и полигонометрии 1 и 2 классов.

Основным методом изучения вертикальных движений является метод высокоточного повторного нивелирования. Определение современных вертикальных движений земной поверхности (СВДЗП) выполняется построением нивелирных сетей I и II классов [5].

Повторные высокоточные нивелирные геодезические измерения дают возможность установить скорость современных вертикальных движений. По результатам повторных геодезических измерений выявлено, что земная кора постоянно подвергается деформационным процессам. Геодезические измерения помогают определить степень активности отдельных тектонических разломов, что является первостепенным значением для сейсморайонирования регионов Анализ результатов повторных геодезических измерений дает возможность изучить характер деформации земной поверхности, происходящей в результате тектонической активности и техногенной деятельности вследствие вмешательства человека при добыче полезных ископаемых из недр Земли.

В последние годы для изучения современных вертикальных движений земной поверхности (СВДЗП) все шире используется метод гидростатического нивелирования. При этом развиваются два направления: в первом из них гидронивелиры используются как «стационарные» системы, а во втором – как мобильные полевые устройства. Преимущества гидросистем – возможность полной автоматизации измерений сразу по многим точкам. Нельзя, однако, не отметить громоздкости этого метода для полевых условий.

Также используется метод тригонометрического нивелирования. Однако он не получил широкого распространения при изучении СДЗП из-за своей малой точности.

Геодезические методы изучения СДЗП выполняются в комплексе с геофизическими, геологическими, геохимическими и геоморфологическими методами.

Геофизические работы по изучению деформаций земной поверхности имеют длительную историю. Первые сети наклономерных станций были созданы в Японии в 30-х годах XX в. Наклономерные наблюдения определяют вели-

чину и форму возникающих аномальных наклонов, указывающих на возможность возникновения землетрясения. Геофизические методы предназначены для поиска краткосрочных и среднесрочных предвестников землетрясений.

Среднесрочный прогноз призван «обеспечить» степень вероятности возникновения в ближайшие 1-2 года сильных или разрушительных землетрясений. На практике среднесрочный прогноз предназначается для заблаговременного принятия мероприятий по предотвращению разрушительных последствий сейсмических катастроф.

Краткосрочный прогноз является заключительным звеном в этапах прогнозирования и имеет заблаговременность не более одного месяца. Основная цель этого этапа состоит в определении времени и уточнении места и силы готовящегося землетрясения, с прогнозированием на предыдущих этапах. В целом проблема краткосрочного прогноза все еще далека от решения. Работы в этом направлении ведутся учеными многих стран мира, в том числе и в Казахстане.

Для непрерывной регистрации изменений деформаций земной поверхности используются деформографы (экстензометры), маятниковые и жидкостные наклономеры и гидростатические уровни большой базы. Наиболее распространены штанговые кварцевые деформографы с базой 20–30 м, а в больших обсерваториях лазерные интерферометры. При изменении наклона земной поверхности предпочтение отдают водотрубным наклономерам большой базы. Деформационные измерения проводятся в подземных изотермических помещениях, где ослаблено возмущающее действие метеорологических факторов.

При изучении медленных деформаций в полевой инструментальной геофизике используют три типа приборов: деформографы – для изучения линейных и объемных деформаций горных пород; наклономеры – для измерения угла наклона земной поверхности и вертикальных сдвиговых деформаций и длиннобазисные гидростатические уровни – для измерения относительных вертикальных смещений.

Достоинством наклономерных наблюдений является высокая чувствительность и непрерывность наблюдений, недостатком то, что измерения относят к коротким расстояниям или отдельным точкам.

В комплексе проводимых исследований большое внимание уделяется изучению современных движений земной коры методами деформографии и наклонометрии. Комплекс наблюдений за современными движениями земной коры подразделяется на стационарные режимные и дискретные профильные наблюдения. При наклономерно - деформографических наблюдениях расположение станций выбирается таким образом, чтобы охватить комплексом геофизических и наклономерно - деформографических наблюдений главные структурные элементы района, характеризующиеся различной тектонической активностью.

Среди геофизических методов особое место занимают магнитометрические исследования. Суть исследований заключается в том, что изменения магнитного поля имеют характерную форму поля над намагниченным телом и свя-

заны с активной жизнью системы разломов. Рост поля на аномальных участках является предвестником землетрясения. Характерно, что на всех точках происходит смена знака аномальности, т. е. там, где до землетрясения наблюдался рост поля, после происходит его уменьшение, а там, где до землетрясения было уменьшение, наблюдается возрастание. Происходит как бы размагничивание тела.

Изучение сейсмомагнитного эффекта может осуществляться высокоточным протонным магнитометром ПМ-5.

Электрометрические исследования. Одним из методов поиска предвестников землетрясений является мониторинг электрического сопротивления земной коры.

Перечисленные методы обеспечивают прямые измерения деформаций горных массивов. Однако объемное деформирование горных пород приводит к изменениям уровня подземных вод, что послужило основанием для развития гидродеформационного метода прогноза землетрясений. Уровень грунтовых вод в колодцах и скважинах перед землетрясением часто повышается или понижается из-за изменений напряженного состояния горных пород. Землетрясения могут и прямо влиять на уровень воды. Вода в скважинах может колебаться при прохождении сейсмических волн, даже если скважина находится далеко от эпицентра. Уровень воды в скважинах, находящихся вблизи эпицентра, часто испытывает стабильные изменения: в одних скважинах он становиться выше, в других ниже.

Для выявления современных движений земной поверхности и их количественной оценки широко используются мореографические наблюдения за уровнем приливов и отливов по берегам морей, различные водомерные наблюдения крупных озер и данные гидрометеорологических постов на реках. В Японии за час или за несколько часов до землетрясения наблюдался аномально низкий отлив. Это означает, что перед землетрясением земная поверхность поднимается. Приливные наблюдения просты, здесь возможны непрерывные измерения, и они обладают тем достоинством, что вводя необходимые поправки, на отдельных пунктах можно вести независимые наблюдения длиннопериодных вертикальных движений. Недостаток – на них непосредственно влияют изменения гидрографических условий, поэтому они не очень точны и ограничены наблюдениями вдоль береговой линии. Наблюдения ведутся при помощи специальных приборов мореографов и футштоков и показывают величину высоты уровня в момент отсчета с точностью до 1 см.

Земная кора, как сказал В.И. Вернадский, испытывает газовое дыхание Земли. Непрерывно и неравномерно в атмосферу выделяются значительные количества газов. В зонах глубинных разломов и в сопровождающих их разрывных нарушениях наблюдается увеличение интенсивности газовыделений и изменение состава газового потока. Установлена связь современных тектонических движений, в том числе и землетрясений, с режимом подземных флюидно-газовых систем, берущих начало в глубоких слоях земной коры, с процессами накопления упругих деформаций горными породами. Ритмичность сейсмо-

тектонической активности территории отражается в изменении состава и интенсивности газовых потоков в выходах на дневную поверхность. Она сопровождается изменениями тепловых, радиохимических, изотопных, солевых составов вод.

Применяют различные методы геохимических исследований в связи с изучением предвестников землетрясений. Активно живущие разломы создают ослабленные зоны в земной коре, образуя пути миграции газа, воды, а в ряде районов и нефти. Для выявления таких участков используют метод эманационного профилирования, по повышенным концентрациям радона и тортона в почвенном воздухе. Эманационная съемка заключается в отборе грунтов проб воздуха на глубине 50–100 см с последующим определением в них содержания радона и торона эманометрами типа М-6 и «Радон». Изменения содержания радона перед землетрясением впервые были замечены перед Ташкенским землетрясением 1966 г., когда десятилетнее возрастание количества радона, растворенного в воде глубоких скважин, сменилось резким его падением.

При проявлении современных движений по разломам изменяется напряженное состояние горных пород и увеличивается концентрация радиоактивных газов, как в самих зонах разломов, так и в перекрывающих их породах.

Важное место при изучении современных движений земной коры принадлежит геоморфологическим исследованиям. Геоморфологические методы составляют обязательный компонент комплексного выявления и установления характеристик современных движений земной коры наряду с геодезическими, геофизическими и другими методами. Геоморфологические исследования позволяют получить характеристики современных движений земной коры, учитывая морфоструктурные и морфоклиматические условия.

Геоморфологические исследования делаются для изучения глубинных структур и прогиба, выявления трещин сейсморазломов, для выявления эпицентров древних землетрясений путем дешифрирования аэрофотоматериалов и полевых геоморфологических наблюдений.

Геоморфологический метод позволяет выделять районы опускания и поднятия и намечать участки интенсивных или слабых движений.

В районах геологических нарушений, особенно в крупных разломах, перед землетрясением радиоактивность повышается по сравнению с естественным уровнем. Когда кончаются подземные толчки, радиоактивность падает до обычной своей нормы. При усилении радиоактивности имеет место поднятие, а при спаде - опускание.

3. ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОЛИГОНЫ

3.1. Цели и назначение прогностических геодинамических полигонов

Исследование современных движений земной поверхности сделало возможным не только констатировать мобильность земной поверхности в настоящее время, но и получить данные о динамике земного шара в целом, об истории развития нашей планеты, а также существенно уточнить наши представления о тектонике верхних частей земного шара. В настоящее время работы в этой области ведутся в основном в двух направлениях.

Во-первых, изучаются вертикальные движения земной коры на больших площадях в целях выяснения устойчивости высотной геодезической сети во времени и установления связи, наблюдаемых движений с различными геофизическими полями и тектоническими процессами.

Во-вторых, исследуются современные движения земной коры на геодинамических полигонах (ГДП) [6,7].

Под термином «Геодинамический полигон» понимается целесообразно выбранная территория, на которой выполняются геодезические, астрономические, гравиметрические и геофизические наблюдения, данные, которых используют для определения движения пунктов земной поверхности. Геодинамические полигоны иногда называют «модельными областями». На большей части геодинамических полигонов исследования ведутся комплексно: одновременно с изучением движений земной коры, как правило, геодезическими методами, проводится широкий комплекс геофизических, геологических, геоморфологических исследований, имеющих целью получение количественных характеристик стабильности взаимного положения точек земной поверхности во времени.

Важная особенность геодинамических полигонов: возможность детального изучения условий проведения наблюдений на каждом пункте сети и использование их при планировании времени и периода проведения измерений.

В изучении деформаций земной коры первостепенное значение имеет качество измерений и точность их результатов. В связи с этим к геодинамическим полигонам предъявляются высокие требования:

– надежная закладка пунктов сети;

– высокоточные измерения на полигоне с применением современных методик наблюдений;

– надежная обработка полученных измерений;

– достоверность полученных результатов наблюдений.

В зависимости от цели проводимых исследований геодинамические полигоны подразделяются на следующие типы полигонов:

– региональные, служащие для определения СДЗП значительных территорий;

– прогностические – их цель, изучение предвестников землетрясений и сейсмическое районирование территории;

– техногенные – создаваемые в местах разработки и добычи полезных ископаемых. Их цель – изучение движений земной поверхности самого месторождения и окружающей территории для прогноза возможных катастрофических явлений;

– полигоны гидроэлектростанций и атомных станций служат для выявления характера и скорости СДЗК, максимальной сейсмической опасности в районах строительства, для решения вопроса стабильности земной поверхности.

Наблюдения на ГДП поставлены на относительно малых участках земной поверхности, которые обычно выбирают в районах активных разломов, на стыках отдельных геологических блоков, в сейсмоактивных областях. Геодинамические полигоны оборудованы высококачественными геодезическими и геофизическими приборами, которые позволяют производить высокоточные измерения высот, пространственных координат, гравитационного и других геофизических полей.

Большое преимущество геодинамических полигонов заключается в относительно малых размерах, позволяющих резко повысить качество измерений, а также их частоту, применяя комплекс различных инструментальных методов. Таким образом, обеспечивается возможность изучения с очень большой детальностью характера деформации земной поверхности на фоне изменений геофизических полей, структуры и рельефа земной коры.

Геодинамические полигоны имеют большое значение также для решения вопросов глобального характера. С этой точки зрения система геодинамических полигонов вдоль зон сочленения крупных тектонических блоков позволяет с большей детальностью изучить основные тенденции движений и их изменения во времени и пространстве. Опыт доказывает, что изучение общих закономерностей на базе применения методов исследований на геодинамических полигонах имеет значение не только для детального анализа геодинамики отдельных районов, но при наличии систем геодинамических полигонов вдоль крупных тектонических линий позволяет изучить также общие вопросы перемещения литосферных плит [8].

Полигоны расположены в различных геолого-тектонических регионах, что дает возможность сравнить как сами движения земной коры, так и явления, им сопутствующие.

3.2. Основные геодезические построения на прогностических геодинамических полигонах

3.2.1. Схемы плановых построений на геодинамических полигонах

Прогностические полигоны – создаются в сейсмически активных районах для прогнозирования землетрясений. Проблема прогноза землетрясений состоит из двух задач: поиск предвестников землетрясений и сейсмическое районирование, которое для крупных городов превращаются в микросейсморайониро-

вание. Главная задача сейсморайонирования – исследование подвижности тектонических блоков на какой-то ограниченной территории.

Прогноз землетрясений занимает важное место среди геолого-геофизических проблем и слагается из предсказания места, времени, силы ожидаемого толчка, а также определения его характера и последствий на земную поверхность. При этом предвестником землетрясения называют аномальные изменения геофизических полей, в том числе и поля геодезических пунктов.

Контур полигона определяется по положению изосейст (линий равных колебаний) землетрясений. Пункты геополигонов закладываются в районах разломов земной коры.

Значительное количество полигонов предназначено в основном для изучения динамики эпицентральных сейсмических зон с целью поисков предвестников землетрясений. На других полигонах проводятся более узкие специальные исследования для решения следующих задач:

– изучается природа современных вертикальных движений. При этом учитываются все движения кратковременного характера или короткопериодические (приливные движения; движения связанные с различными сезонными факторами и ряд др.);

– выявляются и изучаются горизонтальные движения земной коры разными методами;

– изучаются движения в областях глубинных, живущих разломов, стыков отдельных тектонических блоков и плит;

–изучается взаимосвязь медленных и быстрых (сейсмических) движений, что имеет большое значение для прогноза землетрясений, и деформация земной коры периода подготовки землетрясений.

Классическим примером комплексного геодинамического полигона для прогноза землетрясений является область крупного разлома Сан-Андреас в Калифорнии (США), где 18 апреля 1906 г. произошло катастрофическое землетрясение, разрушившее город Сан-Франциско. Американский геофизик Г.Ф. Рейд рассмотрел результаты повторных измерений геодезической сети в эпицентре землетрясения, выполненные до и в 1907 г. после землетрясения. Он выяснил, что смещения геодезических пунктов сконцентрированы в узкой полосе вдоль разлома Сан-Андреас и были максимальны в центре зоны, затухая по мере удаления от разлома. Г.Ф. Рейд первым предложил использовать геодезические измерения СДЗП для обнаружения очага готовящегося землетрясения.

В настоящее время число стран, в которых ведутся наблюдения на геодинамических полигонах, охватывает весь земной шар [6].

На территории бывших стран содружества находится около 50-ти геодинамических полигонов, расположенных в зонах повышенной сейсмической активности территории бывшего СССР. Геодинамические исследования на полигонах были начаты в начале 1970 г. и выполнялись традиционными методами высокоточных геодезических измерений.

Значительные геодезические построения созданы в Средней Азии близ городов Фрунзе, Ташкент, Душанбе, Ашхабад, Алматы. Особый интерес с точ-

ки зрения характера региональных и локальных движений представляет собой Алматинский геодинамический полигон, основанный в 1967 г., и охватывающий один из самых сейсмоактивных районов нашей страны [9,10,11].

На большей части полигонов исследования ведутся комплексно: одновременно с изучением движений земной поверхности геодезическими методами проводится широкий комплекс геофизических, геологических, геоморфологических исследований. Путем повторных комплексных наблюдений можно регулярно контролировать накапливающиеся деформации земной поверхности, изучать характерные особенности их развития во времени и получать достоверную картину современных деформаций и движений земной поверхности.

На основе этих данных можно судить о степени близости деформационного процесса к тому критическому состоянию, при котором происходит землетрясение. Достоверность обнаружения заметных изменений параметров СДЗП зависит в основном от точности измерений, частоты их повторений и пространственного масштаба наблюдаемых сетей по отношению к размерам деформируемой области. Необходимы длительные ряды наблюдений, включая режимные наблюдения (мониторинг) для изучения движений земной поверхности во времени.

Современные горизонтальные деформации земной поверхности (СГДЗП) изучаемой территории определяются на основе анализа фиксируемых точными измерениями изменений отдельных элементов геодезических сетей, происходящих в промежутках времени между повторными циклами наблюдений. СГДЗП изучают в основном методом линейной, угловой или линейно-угловой триангуляции, а также GPS-наблюдениями. Оптимальным вариантом плановых построений на ГДП следует считать линейно-угловую сеть [7,12]. Такие сети однородны по точности, взаимное продольное и поперечное смещение двух каких-либо смежных и несмежных пунктов равны между собой, длина и направление диагоналей не зависит от формы треугольников. В линейно-угловой сети имеется жесткий контроль линейных и угловых измерений.

Изучение СГДЗП на больших площадях методом сплошных геодезических построений требует больших экономических затрат. Кроме того, в сетях значительной протяженности вследствие накопления погрешности положения пунктов могут значительно превзойти годовые горизонтальные сдвиги земной поверхности. Поэтому для изучения локальных и региональных движений земной поверхности более выгодными являются изолированные малые сети, расположенные на некотором удалении друг от друга на характерных разломах и в сейсмоактивных зонах.

Малые угловые и линейно-угловые сети должны иметь короткие стороны (0.5–3 км), наибольшее число пунктов (6–10) и состоять из центральных систем, геодезических четырехугольников и их комбинации.

В сетях, состоящих из 2–3 центральных систем или геодезических четырехугольников целесообразно иметь диагональные направления, пересекающие несколько сторон треугольников, соединяющие главным образом крайние пункты. Диагональные направления помогают уменьшить поперечный сдвиг

геодезического построения, увеличить надежность оценки точности плановой сети.

Геодезические сети на каждом геодинамическом полигоне представляет собой надежно закрепленные на местности линейно-угловые построения повышенной точности, пересекающие ряд разрывных нарушений земной коры. Линейно-угловые сети по своей схеме зависят от рельефа полигона и от его геологического строения.

Возможны линейно-угловые сети следующих видов:

– площадное построение, охватывающее территорию всего полигона (рис. 1). Оно строится в виде сети треугольников, в которых измерены все углы и все стороны. Назначение такой сети – определение горизонтальной деформации исследуемой территории (сжатие, растяжение), определение векторов основных движений на полигоне;

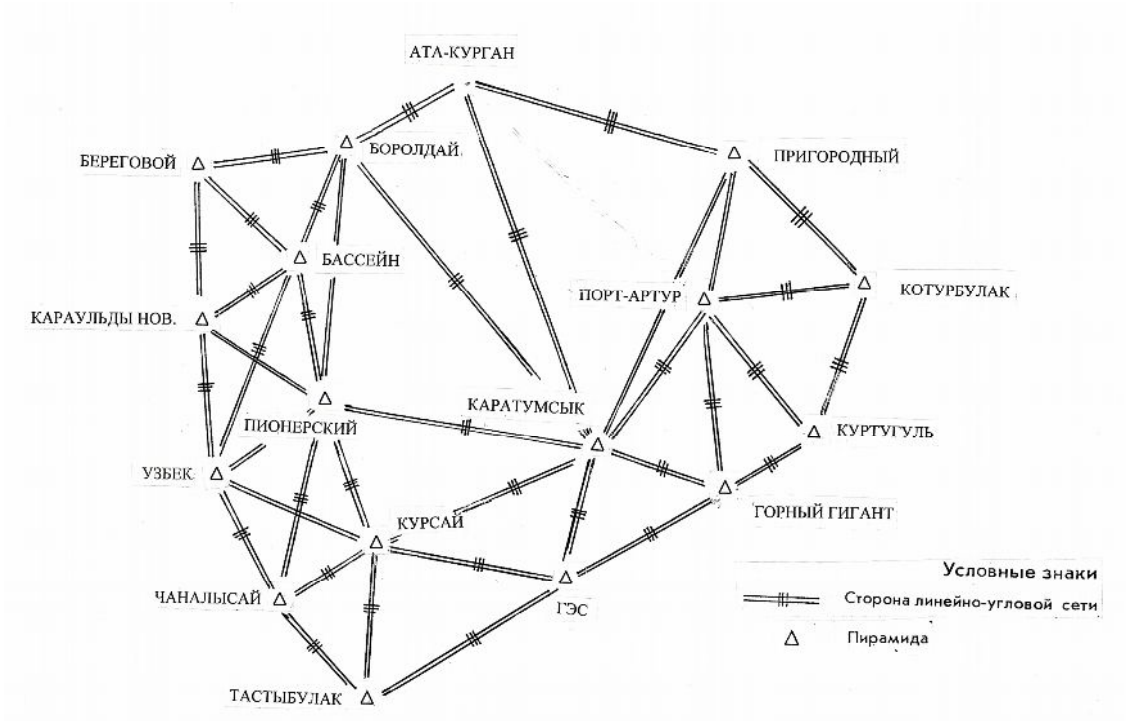


Рис.1. Линейно-угловая сеть Алматинского ГДП

– в зоне разломов строятся геодезические четырехугольники, в которых пункты сети расположены по обе стороны от разлома, а измерение длин сторон позволит контролировать поперечные и продольные сдвиги пунктов;

– в районе вулканов создаются геодезические сети в виде центральных систем;

– на территориях протяженных по длине прокладываются полигонометрические траверсы, в которых измерение сторон ходов выполняется светодальномером и радиодальномером.

Геодезические построения на ГДП соединяются с ГГС для получения пунктов в единой системе координат.

При проектировании линейно-угловой сети по указанию геологов должно быть предусмотрено 3–5 пунктов, находящихся на однородном массиве, которые по предположению не должны менять взаимного положения и при обработке сети их можно принять за неподвижные. Важным является также повторные высокоточные азимутальные определения по одной или нескольким сторонам между неподвижными пунктами, позволяющие следить за поворотными движениями блоков земной коры и высокоточные астрономические наблюдения широт и долгот на неподвижных пунктах (хотя бы на двух).

В начале малая сеть строиться с некоторым запасом пунктов, затем после нескольких повторных измерений и выяснения поведения центров знаков, определения влияния боковой рефракции на отдельные направления конструкция сети упрощается и, если нужно, уменьшается не только число направлений, но и число наблюдаемых пунктов. При этом, прежде всего, исключаются направления, подверженные действию боковой рефракции.

Большинство пунктов, особенно неподвижных, должны иметь по 1–2 запасных центра, координаты которых определяются так же надежно, как и основных. В случае повреждения основных центров они заменяются дополнительными. Центры, количество типов которых в настоящее время достаточно большое, должны быть хорошо термоизолированы и заглубляться в коренные породы или опираться на последние [13].

3.2.1.1. Угловые и линейные измерения в геодезических сетях на геодинамических полигонах

Горизонтальные деформации земной поверхности на ГДП определяются на основе анализа фиксируемых высокоточными измерениями изменений отдельных элементов геодезических сетей, происходящих в промежутках времени между повторными циклами измерений. Это угловые и линейные измерения. Проблема изучения движений земной поверхности, особенно с целью прогнозирования, требует очень высокой точности угловых измерений. Это вызвано тем, что средние квадратические погрешности определения векторов сдвигов геодезических пунктов должны быть значительно меньше самих сдвигов, а современные горизонтальные движения ЗП невелики – мм или см. В целях выявления возможных горизонтальных смещений точек земной поверхности на геодинамических полигонах выполняются угловые и линейные измерения [10, 14]. Это необходимо для получения независимых, взаимно контролируемых результатов.

Наблюдения следует выполнять на визирные марки и целики, при расстоянии более 5 км на малофазовые визирные цилиндры. Из применяемых на производстве способов измерения горизонтальных углов наиболее распространенными (основными) являются способ Шрейбера (измерения отдельных углов во всех комбинациях из n направлений по два) и способ Струве (измере-

ние направлений круговыми приемами). Угловые измерения на пунктах геодезической сети выполняются в соответствии с требованием [13]. Угловые измерения на ГДП выполняются высокоточными оптическими теодолитами типа Т05 или ему подобных, предназначенных для производства угловых измерений на пунктах высокоточных геодезических сетей. К современным высокоточным оптическим теодолитам относятся: Т05, TPS 1000 версия Т Швейцарской фирмы Leica, ТМ1А и др. Теодолиты должны проходить специальный отбор по следующим параметрам: ошибки делений лимба, внутриградусные ошибки, ошибки оптического микрометра, постоянство коллимационной ошибки и др. При соблюдении ряда методических требований теодолиты должны давать возможность измерения угла не более $\pm 5''$, вычисленную по невязкам треугольников. Величины невязок треугольников не должны превышать $2''$. Процесс наблюдений, все допуски по сходимости результатов измерений, общие требования к инструментам должны соответствовать действующей инструкции [13]. К теодолитам предъявляются повышенные требования (табл. 1).

Таблица 1

Требования, предъявляемые к теодолитам

Название ошибки	Предельная величина, "
Полная погрешность делений лимба	1,0
Систематическая часть ошибок делений лимба	0,8
Случайная часть ошибок делений лимба	0,2
Внутриградусные ошибки	0,5
Погрешность оптического микрометра	0,2
Постоянство коллимационной плоскости на зенитных расстояниях 60°–120°	2
Изменение положения фокусирующей линзы	1

Перед началом наблюдений выполняются лабораторные исследования теодолита. В середине полевого сезона производится ремонт теодолита, после чего в лаборатории выполняется исследование эксцентриситета алидады горизонтального круга, определение рена оптического микрометра, определения неравенства подставок. Для определения поправок за центрировку и редукцию на пунктах линейно-угловой сети 1 класса определяются элементы приведения. Для уменьшения ошибок за центрировку и редукцию на пунктах используются приспособления для принудительного центрирования [14]. Приспособление состоит из центра, закрепленного в тумбе, подставки и полого станового винта (рис. 2).

При менее шести направлениях с равными условиями видимости, используют способ круговых приемов, которых должно быть не менее 24. При более 6 направлениях, а также в случае, если число направлений ≤ 6, но условия видимости по ним сильно отличаются или цели расположены на существенно

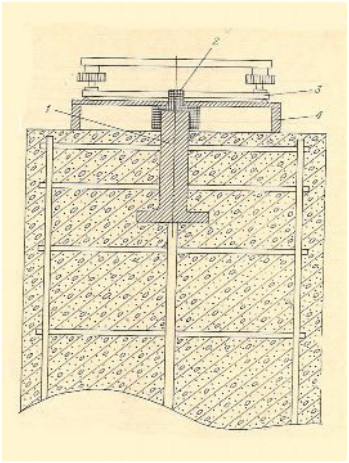


Рис. 2. Схема принудительного центрирования приборов:

1–центр из нержавеющей стали; 2–бронзовый полый становой винт; 3–трегер прибора или отражателя; 4–специальная подставка

различных расстояниях, применяют способ измерения угла во всех комбинациях. Вес измеренного угла при этом должен быть не менее 48.

Способ Шрейбера (во всех комбинациях). Данный способ разработал Гаусс, впервые применил Шрейбер в 1868 г. при построении Прусской триангуляции.

Суть способа [15]: на пункте измеряются все углы, образуемые всевозможными комбинациями 2-х направлений. Число таких углов, определяется формулой

$$n(n-1)/2\,, \tag{1}$$

где n – число направлений на пункте.

В способе Шрейбера каждый угол измеряется непосредственно и еще два раза получается как сумма или разность 2-х других измеренных углов:
(1.2) = (1.4) - (2.4); (1.2) = (1.3) – (2.3); (1.4) = (1.3) + (3.4); (1.4) =(1.2) + (2.4).

При измерении углов данным способом, между приемами делается перестановка лимба на угол

$$\sigma = 180^0 / m + i\,, \tag{2}$$

где m – число приемов; i – цена деления лимба теодолита.

Величина m определяется по формуле

$$P = m \times n\,, \quad m = P / n\,, \tag{3}$$

где n – число направлений.

Вес P – задается инструкцией и принимается равным для 1-го класса 32–48.

Внутри приема также идет перестановка лимба на угол

$$\delta = \frac{\sigma}{n-1} + i \tag{4}$$

при n – четном ,

$$\delta = \frac{\sigma}{n} + i \tag{5}$$

при n – нечетном.

Это необходимо для уменьшения влияния короткопериодической части ошибки диаметров лимба. На каждом пункте составляется программа наблюдений, делают расчет таблицы рабочих установок лимба [15].

Каждый угол при данной установке лимба горизонтального круга измеряют двумя полуприемами. В первом полуприеме измеряют искомый угол, а во втором – дополнение его до 360°. При переходе от приема к приему требуется изменять направление вращения алидады на противоположное. Все подлежащие измерению углы должны быть измерены в разных условиях.

В целях компенсации ошибок из-за рефракции измерения каждого угла как при вечерних, так и при утренних наблюдениях следует выполнять симметрично относительно соответствующего момента изотермии воздуха, когда колебания изображений минимальны, условия видимости наилучшие, а боковая рефракция равна или почти равна нулю.

Способ Струве. В способе Струве на пункте при неподвижном лимбе, вращая алидаду по часовой стрелке, зрительную трубу теодолита последовательно наводят на наблюдаемые направления, начиная с начального и заканчивая начальным направлением. Повторное наведение на начальное направление называют замыканием горизонта. Оно позволяет контролировать устойчивость прибора во время наблюдений и вращения. Указанные действия относятся к первому полуприему.

Второй полуприем заключается в следующем: трубу переводят через зенит и начинают измерения с начального направления, вращая трубу в обратную сторону. Последовательно наводят трубу на наблюдаемые направления, заканчивая наблюдения начальным направлением.

Перед началом наблюдений составляются таблицы рабочих установок лимба.

Для того, чтобы ослабить независимость измерений направлений в разных приемах и одновременно ослабить влияние диаметров лимба на средний результат, лимб между приемами переставляют на угол (3).

Основные допуски при измерении горизонтальных направлений способом круговых приемов и углов способом Шрейбера указаны в[13].

Основными погрешностями при выполнении высокоточных угловых измерений являются: надежность установки теодолита на столике или штативе, кручения знаков, влияние t° окружающей среды на теодолит, погрешность визирования, боковая рефракция. Поэтому при выполнении измерений горизонтальных углов необходимо применять меры по уменьшению влияния данных погрешностей. Измерения горизонтальных углов и направлений производятся при благоприятных условиях видимости, на спокойные или слегка колеблющие изображения визирных целей.

Элементы приведения определяются графическим способом дважды до начала наблюдений и дважды по их окончании. В процессе наблюдений на каждом пункте определяются метеоданные. В горных и предгорных районах в горизонтальные направления должна вводится поправка за уклонение отвесных

линий, т. к. ее не учет может привести к заметному искажению координат пунктов [15]. Поправка за уклонение отвесной линии вычисляется по формуле

$$m_{in} = \left(\eta_i \cos A_{in} - \xi_i \sin A_{in}\right) \times tqZ_{in} \quad , \tag{6}$$

где Z – зенитное расстояние; η_i – поправка за уклонение отвесной линии в плоскости первого вертикала; ξ_i – поправка за уклонение отвесной линии в плоскости меридиана; A_{in} – азимут направления in.

После окончания полевых измерений выполняется оценка точности измеренных углов. Используя невязки треугольников, определяются две независимые средние квадратические погрешности (СКП) измеренного угла и систематические составляющие погрешностей угловых измерений по формулам

$$m_1 = \pm\sqrt{\left[W^2\right]/3n} \;, \quad m_2 = \pm\sqrt{\pi/6 \cdot \left[W\right]/n} \;. \tag{7}$$

$$Q = \left[W\right]/3n \quad , \tag{8}$$

где W – невязка треугольников; n – число треугольников.

Используя измеренные направления, вычисляются свободные члены полюсных условных уравнений, допустимые значения которых определяются по формуле

$$l_{полюса} = \pm 2{,}5m\sqrt{\left[ctg^2\beta\right]}, \tag{9}$$

где β – измеренные углы, образующие условие полюса, $m = 0{,}5''$ – (СКП измерения угла в триангуляции 1 класса).

Целевые назначения и повышенная точность сетей, создаваемых на ГДП, обусловливают необходимость включения статистического анализа в математическую обработку геодезических измерений. Целью статистического анализа является оценка качества различных рядов измерений. На основании выполненного статистического анализа и оценки точности составляется заключение о достоверности и пригодности геодезических измерений для дальнейшей математической обработки и интерпретации с СГДЗП.

Кроме угловых измерений при проведении исследований горизонтальных движений земной поверхности, необходимо выполнить высокоточные линейные измерения. Для линейных измерений при изучении плановых деформаций используются в основном светодальномеры и радиодальномеры для измерения длинных линий [7,16].

Точность определения горизонтальных деформаций зависит также от точности измерения длин линии в сети.

Измерение длин сторон в геодезических построениях на ГДП может выполняться высокоточными светодальномерами Кварц, СГ-3, Геодиметр, Луч, Гранат, ЕОК-2000, Дистомат DI 3000 S и др. Сравнительные технические характеристики светодальномеров приведены в табл. 2. Для высокоточных измерений углов и длин линий можно использовать высокоточные тахеометры TPS1000 версии T, TCM фирмы Leica, Leica TDM 5005, TDA 5005, TPS1200, GPT-9000A. Линейные измерения на пунктах геодезической сети выполняются в соответствии с требованием [7]. В разных циклах наблюдений желательно

использовать один и тот же тип дальномера и отражателя, периоды, программы наблюдений.

Таблица 2

Сравнительные технические характеристики светодальномеров

Модель	Страна производитель	Точность измерения расстояний	Дальность действия, м
«Гранат»	Россия	5мм+2ppm×D	20 000
СГ-3	Россия	4мм+1ppm×D	20 000
ДК 001	Россия	0,8мм+1,5ppm×D	600
МСД-1м	Россия	2мм+5ppm×D	500
Блеск 2	Россия	5мм+3ppm×D	5000
2СТ-10	Россия	2мм+2ppm×D	10 000
Geodimeter 122	Швеция	5мм+2ppm×D	3000
Geodimeter MA	Швеция	5мм+5ppm×D	6000-15 000
Req Eita	ФРГ	5мм+5ppm×D	3000
С1-450	США	5мм+5ppm×D	3000
Авторейджер III	США	5мм+2ppm×D	4000
RED 2	Япония	5мм+5ppm×D	5000
ND 3000	КНР	5мм+3ppm×D	5000
Мекометр ME 3000	Швейцария	0,2мм+1ppm×D	3000
Дистомат D120	Швейцария	5мм+1ppm×D	9000
DM 503	Швейцария	3мм+3ppm×D	5000
Теллурометр MA 100	Великобритания	1,5мм+2ppm×D	2000

Расстояния до 50 км целесообразно измерять светодальномерами, причем для достижения ошибки 1×10^{-6} необходимо и достаточно, чтобы программа измерений включала примерно одинаковое число (по 3 – 4 серии) измерений в дневной и ночной периоды. Расстояния от 50 до 100 км целесообразнее измерять одновременно свето- и радиодальномером. Программа наблюдений должна включать 4–8 серий синхронных наблюдений свето- и радиодальномером, выполненных при различных метеорологических условиях или в разное время суток. Расстояния 100–150 км измеряются радиодальномерами. Сравнительные технические характеристики радиодальномеров приведены в табл. 3.

Таблица 3

Технические характеристики радиодальномеров

Модель	Страна изготовитель	Дальность действия, км	Точность измерения расстояний
«Луч»	Россия	40	3см+3мм/км
«Волна»	Россия	15	3см+3мм/км

Продолжение табл. 3

Варидист GET – A2	Венгрия	30	3см+2мм/км
Теллурометр MRA5	Великобритания	50	10см+3мм/км
Теллурометр MRA6	Великобритания	50	10см+3мм/км
ТеллурометрCA1000	Великобритания	30	15см+5мм/км
Электротейп DM 20	США	50	10см+3мм/км
Дистомат DI 50	Швейцария	150	2см+5мм/км
SIAL MD 60 C	Швейцария	150	10мм+5мм/км

В цикле каждая линия должна быть измерена двумя полными программами. В зависимости от длины линии или других факторов программу наблюдений следует выполнять другим прибором, или по иной методике. При расстояниях до 10 км, когда точность измерения линии определяется в основном ошибками инструментального характера, не зависящими от расстояния, необходимо использовать два прибора.

Предельные расхождения длин, измеренных в разных программах, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Предельные расхождения длин линий

Длина линии, км	Предельные расхождения длин, измеренных в разных программах, мм
< 3	15
3–10	30
10–30	$3\times10^{-6}D$
> 30	$5\times10^{-6}D$

За окончательное значение длины стороны принимается средневесовое из двух независимых программ.

Минимальное число серий в программе, в зависимости от длины линии и средней высоты H, приведено в табл. 5.

Таблица 5

Минимальное число серий в программе

Длина линии, км	Минимальное число серий	
	H до 300 м	$H > 300$
< 3	2	4
3–10	4	6
10–30	6	6
> 30	6	8

При больших расхождениях между сериями выполняются дополнительные серии с целью замены результата измерения, полученного из-за погодных аномалий или по какой-либо другой причине. Допуск линейных измерений составляет ±20 мм.

СКП измерения расстояния для каждой стороны вычисляется по формуле

$$m_S = \sqrt{V^2} / n(n-1), \qquad (10)$$

где V – уклонение среднего результата полученного в серии от среднего значения длины стороны; n – число серий.

Каждый прием состоит из следующих действий:

– наведение на отражатель;

– команда на измерение;

– снятие отсчетов с дисплея;

– запись в журнал основной наклонной дальности и для контроля запись в журнал горизонтального проложения.

Для вычисления поправки ΔV в наклонную дальность за разность высот инструмента и отражателя, приведенную к центрам знаков, один раз в начале наблюдений измеряется зенитное расстояние.

Для достижения высокой точности 1×10^{-6} измерения длин линий программа должна быть построена так, чтобы максимально уменьшить влияние систематических и случайных ошибок, возникающих при светодальномерных наблюдениях.

Основными источниками ошибок наблюдений являются нестабильность частот кварцевых генераторов, определение приборной поправки и ее изменение во времени, точность учета метеопараметров в момент измерения [17,18].

Ошибка учета метеорологических элементов возникает вследствие того, что температура, давление и влажность воздуха измеряются только на конечных точках линии, в то время как требуется (для вычисления показателя преломления воздуха) знать среднее значение этих элементов на всем протяжении измеряемой линии [19]. Эта ошибка является основной, препятствующей точности измерения больших расстояний с ошибкой менее $1\cdot10^{-6}D$. Точность измерения расстояний различными радиофизическими дальномерами в значительной степени определяется полнотой учета условий распространения электромагнитных волн. К основным факторам, влияющим на их распространение, следует отнести длину волны, температуру, влажность и давление воздуха, рельеф и характер подстилающей поверхности, время суток и года и т. д. При геодезических линейных измерениях требуется знание показателя преломления воздуха вдоль пути распространения электромагнитных волн. Он в свою очередь зависит от плотности атмосферы. Объективно существующим свойством атмосферы является неоднородность ее плотности. Только при тщательном учете неравномерности распределения показателя преломления воздуха можно достичь высокой точности линейных измерений. Решение этой задачи требует детального знания метеорологических характеристик приземного слоя атмосферы в районе работ.

Из-за влияния подстилающей поверхности приземный слой атмосферы чрезвычайно изменчив в пространстве и времени и является самым сложным для изучения слоем атмосферы. Высокой точности линейных измерений можно достичь при тщательном учете неравномерности распределения показателя воздуха. Поле коэффициента преломления подвержено сильным вариациям и не существует достаточно надежной математической модели, позволяющей в любой ситуации рассчитать параметры распространяющихся в нем световых волн. Влияние погрешности рабочей скорости на точность измерения расстояния дальномерами может быть снижено за счет более точного учета метеофакторов, важнейшим из которых является изменение температуры воздуха. Измерения должны быть организованы так, чтобы определение t°и влажности воздуха выполнялось на высотах не ниже первого десятка метров. Указанное требование можно выполнить путем использования дистанционных электротермометров. Основным способом учета состояния атмосферы являются метеорологические наблюдения на конечных пунктах линии в моменты измерения.

Измерение влажности производится на пункте стояния приемопередатчика. Поправку за метеоусловия можно также определять следующим способом.

В начале и в конце каждой серии, на пункте установки прибора и отражателя, снимаются отсчеты по метеоприборам:

– атмосферное давление по барометру анероиду с точностью до 0,1 мм рт. ст.;

– температура сухого и влажного воздуха с точностью до $0{,}1^{0}$ по психрометру Ассмана.

Температура влажного воздуха измеряется, как правило, на ведущей станции. Поправки за метеоусловия могут вводится через приборную программу вычисления значения ppm, позволяющую учитывать модуль преломления света, вычисленный по разности температур сухого и влажного термометров. В момент измерения длины линии поправки вычисляются только по метеоданным на ведущей станции. После получения метеоданных с ведомой станции, вычисляются средние значения давления и температуры, по которым вычисляются окончательные значения ppm. Разница ppm с учетом знака вводится в среднее значение длины стороны, полученной в серии как

$$\Delta A_{t_m} = -\left(A_{t_m ведущ.} - A_{t_m сред.}\right) \times D_o \quad , \qquad (11)$$

где D_o – в км; ΔA_{t_m} – в мм.

До начала и по завершении полевых работ, определяются постоянные инструментальные поправки для двух видов отражателей по результатам измерений длин линий эталонного базиса. Выполняется определение приборной поправки светодальномера.

Дальнейшая обработка наклонных дальностей заключается в следующем:

1. Приведение измеренной дальности к центрам знаков, вычисляется по следующей формуле:

$$V_{i/l} = (i - l) \times \sin\alpha - 8{,}33 \times 10^{-5}(i + l) \times D_o км\,, \qquad (12)$$

где i – высота инструмента; l – высота отражателя; α – угол наклона; D_0 – длина линии в км.

2. Приведение наклонной линии к горизонту выполняется по формуле

$$\delta_h = -\left(h^2 / 2D + h^4 / 8D^3\right), \qquad (13)$$

где h – превышение между центрами пунктов; D – наклонное расстояние.

Размерность h и D одинаковая в м.

Горизонтальное проложение получается редуцированным на среднюю высоту между пунктами

$$D_I = D_o - \delta_h\,. \qquad (14)$$

3. Приведение горизонтального проложения на уровень моря выполняется по формуле

$$\delta_H = -\left(kD_{II}H_m \times 10^{-3} + \Delta\right), \qquad (15)$$

где

$$H_m = (H_1 + H_2)/2\;;$$

$$k = \left(1 + e'^2 \cos^2 B \times \cos^2 A / N - H_m / N^2\right) \times 10^6\;;$$

$$\Delta = -D^3 / 24N^2 \times 10^3\;;$$

$$D_{II} = D_0 - \delta_H\;;$$

H_1 и H_2 – высоты пунктов в начальной и конечной точках линии; D_{II} – горизонтальное проложение линии на среднюю плоскость; N – радиус кривизны первого вертикала в м; e' – второй эксцентриситет меридианного эллипса ; B – широта измеренной стороны; A – азимут стороны; H_m – средняя высота стороны над уровнем моря; Δ – поправка очень малая, вводится начиная с 10 км.

4. Приведение длины стороны на поверхность референц-эллипсоида выполняется по формуле

$$\delta\varsigma = \left[H_2 - H_1 / D \times (\varsigma_2 - \varsigma_1) + \varsigma_1 + \varsigma_2 / 2R \times D\right] \times 10^3\,, \qquad (16)$$

где ς_1 и ς_2 – высота геоида над референц-эллипсоидом в начальной и конечной точках стороны в м ; H_2 и H_1 –высоты приборов над уровнем моря в начальной и конечной точках стороны в м ; D – длина стороны в м ; R – средний радиус кривизны Земли в м; $2R = 12{,}6 \times 10^6$ м.

5. Приведение длины стороны на плоскость проекции Гаусса выполняется введением поправки δ_L, вычисляемой по формуле

$$\delta_L = (k_1 + k_2) \times D_{III} / k_3\,, \qquad (17)$$

где

$$k_1 = \left(y^2{}_m / 2R^2 + y_m^4 / 24R^4\right) \times 10^7\;;$$

$$k_2 = \Delta y^2 / 24R^2 \times 10^7\;;$$

$$k_3 = R_i / R_0 \times 10^4\;;$$

$y_m = (y_1 + y_2)/2$ – средняя ордината; $\Delta y = y_2 - y_1$ – разность ординат конечных точек стороны; R_i – средний радиус кривизны в средней точке стороны; R_0 – средний радиус на широте 0° (экватор) = 6 356 863 м; y_1 и y_2 – ординаты отсчетов от осевого меридиана зоны.

Широкое внедрение современной микроэлектроники в приборостроение привело к быстрому развитию электромагнитных методов измерения углов и расстояний. Современные электронные тахеометры – сложные оптико-электронные приборы, интегрирующие последние технические достижения ведущих мировых фирм в области электроники, оптики, точной механики, лазерной техники, информационных технологий. Это многофункциональные приборы, позволяющие производить угловые и линейные измерения с возможностью полной дальнейшей автоматизации обработки результатов измерений.

Ведущие производители электронных тахеометрических систем: Spektra Precision (Швеция/Германия), Leika (Швейцария), Sokkia, Topcon, Nikon, Rentax (Япония), выпускающие около 100 моделей и модификаций электронных тахеометров, рассматривают последние как геодезические системы первичного значения, функциональные возможности которых дополняться возможностями спутниковых приемников.

Современный высокоточный электронный тахеометр можно использовать как прибор для измерения углов и расстояний при создании линейно-угловых сетей на геодинамических полигонах.

3.2.1.2. Математическая обработка повторных наблюдений в плановых построениях на геодинамических полигонах

Горизонтальные деформации земной поверхности, изучаемой территории, определяются на основе анализа фиксируемых точными измерениями изменений отдельных элементов геодезических сетей, происходящих в промежутках времени между повторными циклами наблюдений. Так как наблюдаемые изменения являются следствием смещений пунктов геодезических построений, то наиболее очевидным путем определения деформаций является сравнение координат одноименных пунктов, вычисленных по измерениям различных циклов и получение разностей этих координат. Существует две возможности получить эти разности. Одна из них, традиционно используемая, предполагает раздельное уравнивание каждого цикла, а вторая – уравнивание разностей непосредственно измеренных в этих циклах элементов геодезических сетей с целью прямого получения соответствующих им изменений координат пунктов. При этом обработка каждого отдельного цикла измерений выполняется по обычной схеме уравнивания линейно-угловых или триангуляционных сетей. В настоящее время существует несколько вариантов реализованной на ЭВМ методики решения этой задачи. В основу положен параметрический способ уравнивания [20]. Исходными являются редуцированные на плоскость проекции Гаусса-Крюгера:

– измеренные на каждом пункте направления, приведенные к выбранному нулевому направлению;

– длины сторон между смежными пунктами;

– дирекционные углы, полученные на основе азимутов Лапласа.

В результате получают две реализации сети, соответствующие обработанным циклам измерений. По полученным разностям координат строят векторы смещений пунктов, которые должны отражать происшедшие деформации. Обработка полевых измерений и дальнейшее уравнивание сетей отдельных циклов измерений может быть выполнено в системе CREDO_DAT.

При данном методе обработка измерений в повторных циклах, приближенные координаты пунктов, вычисляют относительно любой пары точек в произвольной системе координат [21].

Длины векторов смещений на пунктах и их азимуты определяются по разностям соответствующих координат пунктов, полученных в очередных циклах наблюдений. Длина вектора r вычисляется по формуле

$$r = \sqrt{\Delta x_{ik}^2 + \Delta y_{ik}^2}\ , \qquad (18)$$

где $\Delta x = x_k - x_i$, $\Delta y = y_k - y_i$, а x_i и y_i – координаты пункта, полученные в i цикле наблюдений, x_k и y_k – координаты пункта, полученные в k последующем цикле наблюдений.

По полученным векторам смещений определяются компоненты деформаций. Компоненты деформаций представляют собой элементы кусочно-линейной аппроксимации исследуемой территории, разбитой на элементарные треугольники, составленные из пунктов геодезической сети [21]. Для их определения необходимы координаты вершин треугольников X_i, Y_i, X_j, Y_j, X_k, Y_k и соответствующие смещения u_i, v_i, u_j, v_j, u_k, v_k по координатам X и Y.

Условимся, что в вершине треугольника 1 разности ее координат в двух сравниваемых реализациях равны 0. Примем далее эту вершину за начало местной системы координат. Разности координат во 2 и 3 вершинах треугольника можно определить по формулам

$$\begin{aligned} u_j &= x_j'' - x_j';\ u_k = x_k'' - x_k', \\ v_j &= y_j'' - y_j';\ v_k = y_k'' - y_k', \end{aligned} \qquad (19)$$

где $x_j', x_j'' \ldots$ – являются приращениями координат вершин 2 и 3 относительно 1 вершины в первом и втором циклах наблюдений

$$\begin{aligned} x_j' &= X_j' - X_i',\ \ y_j' = Y_j' - Y_i'; \\ x_k' &= X_k' - X_i',\ \ y_k' = Y_k' - Y_i', \end{aligned} \qquad (20)$$

где X_i', X_j' и т. д. – координаты вершин в первом цикле. Аналогично определяются разности вершин во втором цикле.

Определяются следующие параметры деформаций: сдвиг γ_m и его компоненты γ_1 и γ_2, дилатация Δ, вращение ω, максимальное и минимальное растяжение или сжатие E_1 и E_2, азимут направления $E_1 - \alpha$.

Для определения параметров деформации используются следующие формулы

$$\gamma_m = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}\ ; \tag{21}$$

$$\gamma_1 = \frac{-x_j v_k - y_j u_k + x_k v_j + y_k u_j}{x_j y_k - x_k y_j}; \tag{22}$$

$$\gamma_2 = \frac{x_j u_k - y_j v_k - x_k u_j + y_k v_j}{x_j y_k - x_k y_j}; \tag{23}$$

$$\gamma_1 = \frac{x_j v_k - y_j u_k - x_k v_j + y_k u_j}{x_j y_k - x_k y_j}; \tag{24}$$

$$\omega = \frac{x_j u_k + y_j v_k - x_k u_j - y_k v_j}{2(x_j y_k - x_k y_j)}; \tag{25}$$

$$E_1 = (\Delta + \gamma_m)/2\ ; \tag{26}$$

$$E_2 = (\Delta - \gamma_m)/2\ ; \tag{27}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} arctq\left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right) \text{ при } \gamma_1 < 0 \tag{28}$$

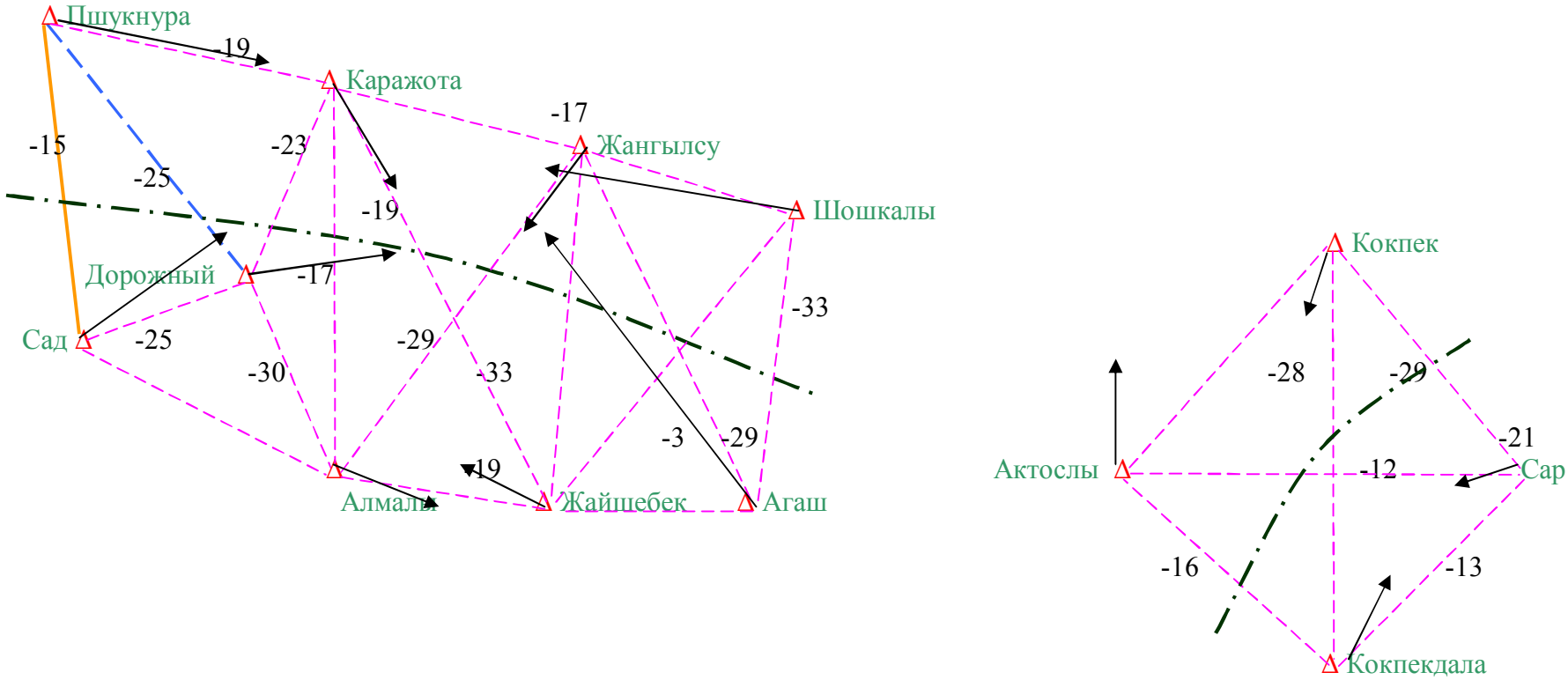
или

$$\alpha = \frac{1}{2} arctq\left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right) + 90^0 \text{ при } \gamma_1 > 0. \tag{29}$$

α определяет направление оси, по которой будет откладываться E_1.

При $\gamma_1 > |\Delta|$ – это будет ось максимального растяжения. В случае, когда дилатация отрицательна и по абсолютной величине превосходит γ_1 – это будет ось минимального сжатия.

Вращение ω характеризует разворот треугольника, как единого целого. Дилатация Δ выражает относительное изменение площади рассматриваемого участка деформируемой поверхности. Наглядной формой описания деформированного состояния исследуемого района являются картосхемы, показывающие векторы смещений пунктов (рис. 3), величины и направление главных деформаций, возможные масштабные изменения. При построении таких картосхем характеристики деформаций состояния каждого треугольника относят к его центру тяжести. Дилатацию обычно изображают в виде картосхем с изолиниями, которые проводят по ее значениям для центров треугольников. Места сгущения изолиний показывают площадное распределение областей растяжения и сжатия исследуемой территории не только качественно, но и количественно.



Условные обозначения

Δ – Пункт триангуляции

-15 – Разность длин сторон за 1992–1974 гг, мм:

– Основные разломы

– Сторона триангуляции 1 класса

– Вектор горизонтальных смещений за интервал 1992–1974 гг

Рис. 3. Схема сети Шелекского полигона с векторами горизонтальных смещений пунктов и разностями наклонных дальностей

3.2.2. Основные высотные построения на прогностических ГДП

3.2.2.1. Методика выполнения нивелирования на ГДП

Нивелирная сеть I и II классов на геодинамических полигонах предназначается для изучения современных движений земной коры, поиска предвестников землетрясений, выявления активных поверхностей и глубинных разломов, наиболее активных участков тектонического строения земной коры. Проект схемы размещения реперов, периметры нивелирных полигонов разрабатывают в каждом отдельном случае [7].

На геодинамических прогностических полигонах, приуроченных к активным глубинным разломам и разрывам земной коры и охватывающих районы возможных эпицентров разрушительных землетрясений, высотные сети создают в виде пересекающихся линий нивелирования I и II классов, которые привязывают к главной высотной основе.

Нивелирная сеть представляет собой замкнутый полигон с диагональными ходами. Нивелирные полигоны относятся к таким геодезическим построениям, которые охватывают одно или несколько тектонических нарушений протяженностью до нескольких километров.

Исходя из полученных закономерностей связи движений земной поверхности с сейсмичностью, сети на геодинамических полигонах должны быть трехзвенными.

Первое звено – разреженная региональная сеть геодезических реперов, в идеале охватывающая всю геодинамическую систему с единым режимом геотектоники. Репера должны располагаться на основных геологических структурах региона.

Второе звено – сеть в районе расположения структур, в которых происходят самые сильные землетрясения.

И, наконец, третье звено – локальные построения в приразломных зонах, на контактах активных морфоструктур и др.

На геологической основе, дополненной элементами новейшей тектоники и сейсмодислокаций, распределением эпицентров крупнейших землетрясений прошлого и проявлением современной сейсмичности, проводится целенаправленный выбор площадей для создания геодезических сетей с целью изучения современных движений земной поверхности в различных геолого – тектонических условиях. Расположение линий нивелирования выбирается таким образом, чтобы они пресекали основные геоморфологические структуры (рис.4).

Нивелирные линии жестко закрепляются на поверхности земли нивелирными знаками – реперами. Тип, конструкция и способ закрепления нивелирных знаков выбираются в зависимости от их назначения, физико-географических характеристик района и от конкретных условий мест крепления [22, 23]. К устойчивости геодезических знаков предъявляются высокие требования.

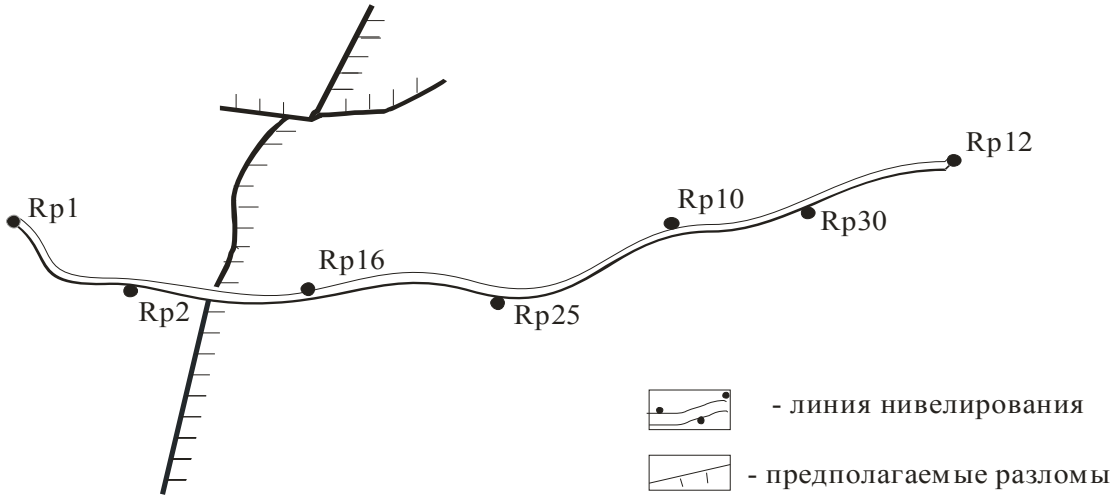


Рис. 4. Линия нивелирования в зоне разлома

Методическими руководствами по работам на геодинамических полигонах предписывается выполнять первый цикл измерений только через год после закладки центров. При изучении современных движений и деформаций земной коры обязательными требованиями для репера являются:

– надежная устойчивость во времени;

– многолетняя сохранность с неповрежденным центром;

– доступность для выполнения повторных измерений;

– размещение с учётом геолого-тектонических, геоморфологических и гидрологических условий.

Таким требованиям в основном соответствуют репера Государственной геодезической сети (ГГС). Знаки, на которых в современных условиях осуществляются измерения, должны быть по возможности универсальными с тем, чтобы их можно было одновременно использовать для высокоточных нивелирных, спутниковых и гравиметрических измерений.

Реперы используются с учётом климатических и физико-географических условий района. Они должны изготавливаться и закладываться с особой тщательностью для обеспечения их сохранности и устойчивости по высоте в течение длительного времени. Реперы должны быть стойкими в отношении механических нагрузок и химического воздействия грунтового раствора.

При выборе места закладки должны быть исключены участки, подверженные необратимым деформациям грунтов, затопляемые территории и места повышенного риска для сохранности реперов из-за различных строительных и сельскохозяйственных работ. При этом следует выбирать участки, где грунтовые воды находятся, как правило, на глубине более 3 м от поверхности земли.

Для закладки реперов необходимо использовать наиболее благоприятные места – с выходом скальных пород, повышенные формы рельефа с крупнозернистым и слабо увлажненным грунтом, с глубоким залеганием грунтовых вод.

В населенных пунктах могут быть заложены стенные марки реперы в основные несущие элементы кирпичных, каменных, бетонных и железобетонных зданий и сооружений, построенных не менее чем за 7 лет до закладки. При выборе места закладки репера кроме геодезиста желательно участие геолога.

Линии нивелирования на геодинамических полигонах закрепляют фундаментальными и грунтовыми реперами. Фундаментальные реперы закладывают в узлах полигонов, а также на концах радиальных линий. При закреплении линий нивелирования на геодинамических полигонах отдают предпочтение скальным и стенным реперам. В центре диска марки имеется отверстие диаметром 4 мм для штифта подвесной рейки. Грунтовые и стенные реперы и марки устанавливают на нивелирных линиях всех классов через 5–7 км и в труднодоступных районах – через 10–15 км. Все старые реперы и неработающие скважины на расстоянии 0.5 км от линии нивелирования I класса и до 1км от линии нивелирования II класса, обязательно включают в ходовые линии или привязывают к ним. К неработающей скважине приваривают марку, которая служит вековым репером. Если на полигоне нет таких скважин, то закладывают вековой репер. На площадке на расстоянии 30–70м от векового репера закладывают все типы центров и реперов, применяемых на данном полигоне. Два раза в год (зимой и летом) нивелируют все реперы на площадке и сопоставляют полученные превышения. Типы реперов, явно неустойчивых, исключают из дальнейшего нивелирования.

Определение высотных отметок точек местности в локальном и региональном масштабах или в масштабе страны осуществляется путем определения относительных высот (превышений) точек земной поверхности. Совокупность методов определения высот обозначается общим термином «нивелирование». Способы нивелирования определяются классом нивелирования и делятся на нивелирование I, II, III, IV класса, техническое нивелирование. Для определения современных вертикальных движений земной коры на геодинамических полигонах используется высокоточное нивелирование I и II классов. Рассмотрим методику выполнения нивелирования I и II классов [22, 23].

Методика нивелирования I класса.

Нивелирование I класса выполняется методом совмещения по двум парам костылей, образующих две отдельные линии нивелирования: правую, соответствующую ходу по правым костылям, и левую – по левым костылям. Нивелирование прокладывают в прямом и обратном направлениях. Наблюдения на станциях выполняют в следующем порядке (табл.6).

В обратном ходе на нечетных станциях наблюдения начинают с передней рейки, а на четных – с задней.

Последовательность наблюдений на станции следующая:

– тщательно приводят пузырьки установочных уровней на середину;

– наводят трубу нивелира на основную шкалу задней рейки, стоящем на правом костыле, ставят отсчетный барабан на отсчет 50, вращением элевационного винта приближенно совмещают изображения пузырьков уровня и после этого производят дальномерные отсчеты по трем нитям;

Таблица 6

Методика нивелирования I класса

Прямой ход				Обратный ход			
Правая нивелировка		Левая нивелировка		Правая нивелировка		Левая нивелировка	
нечетная станция	четная станция	нечетная станция	четная станция	нечетная станция	четная станция	нечетная станция	четная станция
ООЗР	ООПР	ООЗР	ООПР	ООПР	ООЗР	ООПР	ООЗР
ООПР	ООЗР	ООПР	ООЗР	ООЗР	ООПР	ООЗР	ООПР
ОДПР	ОДЗР	ОДПР	ОДЗР	ОДЗР	ОДПР	ОДЗР	ОДПР
ОДЗР	ОДПР	ОДЗР	ОДПР	ОДПР	ОДЗР	ОДПР	ОДЗР

ООЗР – Отсчет по основной шкале задней рейки
ООПР – Отсчет по основной шкале передней рейки
ОДПР – Отсчет по дополнительной шкале передней рейки
ОДЗР – Отсчет по дополнительной шкале задней рейки

– вращением элевационного винта точно совмещают изображения концов пузырька уровня; вращением отсчетного барабана точно наводят биссектор на ближайший штрих основной шкалы рейки и отсчитывают по рейки и отсчетному барабану отсчет;

– наводят трубу на основную шкалу передней рейки, стоящей на правом костыле, и производят все действия, указанные выше;

– наводят трубу наводящим винтом на дополнительную шкалу передней рейки; смещают уровень поворотом элевационного винта на четверть оборота, снова точно совмещают вращением элевационного винта изображения концов пузырька уровня, и выполняют остальные действия, перечисленные выше;

– наводят трубу нивелира на дополнительную шкалу первой рейки, стоящей на правом костыле; выполняют все действия, указанные выше;

– переставляют обе рейки на левые костыли и выполняют наблюдения левой нивелировки в той же последовательности, как и для правой нивелировки.

Отсчеты по рейкам снимают не ранее, чем через полминуты после установки рейки на костыле по уровню и обязательно после полного успокоения цилиндрического уровня нивелира.

На время перехода наблюдателя на следующую станцию переднюю рейку снимают с костыля.

Расстояние от нивелира до реек измеряют тонким стальным тросом длиной 50 м с разметками через 5 м. Неравенство расстояний не должно превышать 0,5 м, а накопление этих неравенств не должно превышать 1 м.

Нивелирование выполняют участками 20 – 40 км по схеме «восьмерка».

При перерывах в работе наблюдения заканчивают на постоянных знаках или на трех парах костылей (две станции), забитых в дно ям глубиной 0,3 м. Нивелирование на обеих станциях выполняют по обычной программе, после

чего костыли покрывают травой и засыпают землей. После перерыва повторяют нивелирование на последней станции, а при необходимости – на предпоследней.

На каждой станции выполняют контроль наблюдений, который заключается в следующем;

– подсчитывают превышения на станции по наблюдениям основной и дополнительной шкал реек для каждого хода (правого и левого), разность этих превышений для каждого хода не должна превышать 0,5 мм (10 делений отсчетного барабана);

– подсчитывают по наблюдениям основных и дополнительных шкал реек превышения заднего правого костыля над передним левым костылем; расхождения между превышением задней пары костылей данной станции и превышением передней пары костылей предыдущей станции не должно превышать 0,7 мм (14 делений отсчетного барабана).

Выполняют контроль нивелирования по секции между смежными реперами и по участку между фундаментальными реперами.

После выполнения двойного хода на данной секции подсчитывают превышения в этой секции отдельно для правой и левой линии нивелирования прямого и обратного ходов, а также среднее из результатов правой и левой линии нивелирования прямого и обратного ходов.

Расхождения между превышениями правой и левой нивелировок одного и того же направления, а также между превышениями прямого и обратного ходов, полученными как среднее из результатов правой и левой нивелировок, не должны превышать $\pm 3\ мм\sqrt{L}$ [23,24], (где L – длина секции в км). В некоторых случаях расхождения между превышениями прямого и обратного ходов могут быть больше допустимых значений. В этих случаях нивелирование повторяют. Если результаты повторного нивелирования не отличаются от двух первых нивелировок более чем на $\pm 5\ мм\sqrt{L}$, то за окончательное принимают среднее из трех измерений. В противном случае секцию нивелируют заново.

После окончания наблюдений на участке в прямом и обратном направлениях в измеренные превышения вводят поправки за неверность длины среднего метра реек и за температуру воздуха во время нивелирования. Поправка за неверность длины среднего метра реек вводится по результатам определения его на компараторе.

После введения поправок и вывода средних превышений вычисляют разности превышений и их накопления.

Прямой и обратный ходы прокладывают по одной той же трассе и по переходным точкам одного и того же типа. В качестве переходных точек при нивелировании применяют костыли длиной 20 – 25 см с диаметром 2 – 2,5 см и весом 1 кг и длиной 9 – 12 – 15 см с диаметром 1 см и весом 0,5 кг. При нивелировании по асфальту применяют кованые гвозди с полусферической головкой длиной 5 – 7 см и толщиной 1,5 – 2 см и башмаки. Максимальная длина визирного луча принимается равной 50 м, высота его над землей – 0,8 м; при

длине визирного луча 25 м и меньше высота визирного луча принимается равной 0,5 м над поверхностью земли.

Методика нивелирования II класса.

Нивелирование II класса выполняется методом совмещения в прямом и обратном направлениях по одной паре костылей.

Таблица 7

Методика нивелирования II класса

Прямой ход		Обратный ход	
нечетная станция	четная станция	нечетная станция	четная станция
ООЗР	ООПР	ООПР	ООЗР
ООПР	ООЗР	ООЗР	ООПР
ОДПР	ОДЗР	ОДЗР	ОДПР
ОДЗР	ОДПР	ОДПР	ОДЗР

При нивелировании в обратном направлении наблюдения на нечетных станциях начинают с передней рейки, а на четных – с задней.

Последовательность наблюдений на станции следующая:

– приводят на середину пузырьки установочных уровней;

– наводят трубу на основную шкалу той рейки, которую наблюдают первой; ставят отсчетный барабан на отсчет 50; вращением элевационного винта приближенно совмещают изображения концов пузырька уровня; производят дальномерные отсчеты по трем нитям;

– вращением элевационного винта точно совмещают изображения концов пузырька уровня; вращением отсчетного барабана точно наводят биссектор на ближайший штрих основной шкалы; снимают отсчет по рейки и отсчетному барабану;

– наводят трубу на основную шкалу второй рейки; производят все действия, указанные выше;

– наводят трубу наводящим винтом на дополнительную шкалу рейки; смещают уровень поворотом элевационного винта на четверть оборота; снова точно совмещают изображения концов пузырька уровня элевационным винтом и выполняют остальные действия, перечисленные выше;

– наводят трубу на дополнительную шкалу первой рейки и выполняют действия, перечисленные выше.

Неравенство расстояний от нивелира до реек не должно превышать 1 м, а накопление этих неравенств на секцию не должно превышать 2 м [22].

На каждой станции подсчитывают превышения по наблюдениям основной и дополнительной шкал. Разность этих превышений не должна превышать 0,7 мм (14 делений отсчетного барабана). При нивелировании контролируют полученные результаты по секциям и участкам между фундаментальными реперами. Контроль заключается в следующем;

- по выполнении двойного хода на данной секции подсчитывают превышения в этой секции отдельно для прямого и обратного ходов. Расхождения

между этими превышениями не должны превышать $\pm 5\ мм\sqrt{L}$ для секций, на которых среднее число станций менее 15 на километр хода, и $\pm 6\ мм\sqrt{L}$ для секций, на которых среднее число станций больше 15 на километр хода. Если расхождения получились более допустимых значений, то повторяют нивелирование секции в одном направлении. Если результаты этого нивелирования не отличаются от результатов каждого из двух первых более чем на $\pm 8\ мм\sqrt{L}$ (или соответственно $\pm 10\ мм\sqrt{L}$), то за окончательное значение берут среднее из превышений всех трех нивелировок. При расхождениях, превышающих указанные допуски, повторяют прямой и обратный ходы.

- по выполнении двойного хода на данном участке между двумя фундаментальными реперами подсчитывают превышения. Если расхождения между превышениями превосходят $\pm 5\ мм\sqrt{L}$, то при нивелировании последующих участков принимают меры для ослабления влияния систематических ошибок.

Нормальная длина визирного луча принимается равной 50 м; в хорошую видимость длину визирного луча можно увеличить. Высота визирного луча должна быть не менее 0,5 м.

При выполнении нивелирования I и II классов число штативов в прямом и обратном ходах каждой секции по возможности должно быть четным.

При переходе от прямого хода к обратному ходу рейки меняют, т. е. четную рейку ставят на место нечетной и наоборот.

Прямой и обратный ходы для каждой секции, как правило, прокладывают в разное время дня.

Прямой и обратный ходы прокладывают участками, состоящими из смежных секций общей длиной 25–50 км.

Наблюдения начинают спустя 0,5 ч после восхода солнца. Заканчивают за 1 ч до захода солнца. В пасмурную погоду продолжительность работ несколько удлиняют.

Измерения выполняют только при благоприятных условиях видимости и при достаточно отчетливых и спокойных изображениях штрихов реек.

Во время нивелирования инструмент защищают от солнечных лучей зонтом, обшитым белым материалом. При переноске со станции на станцию инструмент накрывают чехлом из белой плотной материи, в пасмурную погоду – чехлом из тонкого брезента.

Через каждые два штатива измеряют температуру воздуха термометром-пращом. Кроме того, на рейке должен быть установлен жидкостный термометр, показания которого сравниваются с термометром – пращом.

В последние годы при нивелировании различных классов начали применяться цифровые (электронные) нивелиры со штрих - кодовыми рейками. В связи с этим кардинально изменяется технология нивелирных работ, начиная от проектирования и заканчивая математической обработкой результатов измерений.

Вопросы разработки и совершенствования технологии государственного нивелирования с использованием цифровых нивелиров рассмотрены в трудах

российских ученых Г.А. Уставича, В.Ф. Шульского, О.И. Винокурова [25,26, 27,28]. Ими предложены программы наблюдений с использованием цифровых нивелиров.

В основу программ нивелирования I класса положен принцип наблюдения на станции по схеме ($З_0П_0П_ДЗ_Д$), хотя нельзя отбрасывать и возможность применения схемы ($З_0З_ДП_ОП_Д$). Нивелирование может быть выполнено по четырем программам наблюдений (табл. 8). Последовательность наблюдений на станции при нивелировании I класса показана в табл. 9.

Общим для всех программ является сохранение технологической схемы проложения нивелирного хода одновременно по двум парам костылей, образующих две отдельные линии, в прямом и обратном направлениях.

Программа А наблюдения на станции предусматривает использование двусторонних штрих - кодовых (к) реек и нивелира только с цифровым отсчитыванием. Максимальная длина визирного луча S обусловлена техническими возможностями оптической системы прибора.

Таблица 8

Программы цифрового нивелирования I класса

Класс нивелирования	Smax,м	Программа работы на станции	Число линий (горизонтов прибора)	Число ходов	Число превышений	ΔS,м	ΣΔS,м
I	50	A (2k)	2	2	8	1,0	1,0
		B (1k+1ш)			8		
		C (1k+1k)			8		
		D (1k+1k)			8		
		E (1k)			4		
II	60	A (2k)	1	2	4	2,0	2,0
		B (1k+1ш)			4		
		C (1k+1k)			4		
		D (1k+1k)			2		

Таблица 9

Последовательность наблюдений на станции при нивелировании I класса

Программа наблюдений	Станция	Последовательность наблюдения реек на станции			
		Прямой ход		Обратный ход	
		правая линия	левая линия	правая линия	левая линия
A (2k)	Нечетная	$З_К, П_К, П_К^0, З_К^0$	$З_К, П_К, П_К^0, З_К^0$	$П_К, З_К, З_К^0, П_К^0$	$П_К, З_К, З_К^0, П_К^0$
	Четная	$П_К, З_К, З_К^0, П_К^0$	$П_К, З_К, З_К^0, П_К^0$	$З_К, П_К, П_К^0, З_К^0$	$З_К, П_К, П_К^0, З_К^0$
B (1k+1ш)	Нечетная	$З_К, П_К, П_Ш, З_Ш$	$З_К, П_К, П_Ш, З_Ш$	$П_К, З_К, З_Ш, П_Ш$	$П_К, З_К, З_Ш, П_Ш$
	Четная	$П_К, З_К, З_Ш, П_Ш$	$П_К, З_К, З_Ш, П_Ш$	$З_К, П_К, П_Ш, З_Ш$	$З_К, П_К, П_Ш, З_Ш$

Продолжение табл. 9

C (1k+1k)	Нечетная	ЗК, ПК, ПК/, ЗК/	ЗК, ПК, ПК/, ЗК/	ПК, ЗК, ЗК/, ПК/	ПК, ЗК, ЗК/, ПК/
	Четная	ПК, ЗК, ЗК/, ПК/	ПК, ЗК, ЗК/, ПК/	ЗК, ПК, ПК/, ЗК/	ЗК, ПК, ПК/, ЗК/
D (1k+1k)	Нечетная	$(З_К, П_К)_1$, $(П_К, З_К)_4$	$(П_К, З_К)_2$, $(З_К, П_К)_3$	$(П_К, З_К)_1$, $(З_К, П_К)_4$	$(З_К, П_К)_2$, $(П_К, З_К)_3$
	Четная	$(П_К, З_К)_1$, $(З_К, П_К)_4$	$(З_К, П_К)_2$, $(П_К, З_К)_3$	$(З_К, П_К)_1$, $(П_К, З_К)_4$	$(П_К, З_К)_2$, $(З_К, П_К)_3$
E (1k)	Нечетная	$З_К, П_К$	$П_К, З_К$	$П_К, З_К$	$З_К, П_К$
	Четная	$П_К, З_К$	$З_К, П_К$	$З_К, П_К$	$П_К, З_К$

Примечание: $З_К$, $П_К$, $П_К^0$, $З_К^0$ – отсчёты по обеим сторонам штрих -кодовой рейки; $З_Ш$,$П_Ш$ – отсчёты по штриховой шкале с помощью оптического микрометра; $З_К^/$, $П_К^/$ – отсчёты после изменения микрометра; $(З_К, П_К)_{1,2.,3,4}$, $(П_К, З_К)_{1,2,3,4}$ – отсчёты в порядке возрастания по ходу часовой стрелки и против её хода.

Программа B наблюдения на станции предусматривает применение двусторонних реек: одна сторона штрих - кодовая (к), другая – штриховая (ш). В этом случае должен применяться цифровой нивелир, снабженный оптическим микрометром (новая конструкция). Последовательность взятия отсчетов по рейкам также аналогична последовательности, применяемой при существующей методике нивелирования I класса. При этом отсчёты берутся сначала по штрих - кодовой стороне рейки, затем по штриховой.

Программа C наблюдения на станции применяется только при наличии одной штрих - кодовой стороны рейки. Программа C предусматривает выполнение нивелирования отдельно по правой и левой линиям. Наблюдения на станции выполняются при двух горизонтах нивелира. Например, на нечетной станции в прямом ходе нивелирования последовательность взятия отсчётов следующая:

– правая линия нивелирования: отсчеты ($З_к П_к$); изменение горизонта на 2 – 4 мм; отсчёты ($П_к^/$, $З_к^/$);

– по левой линии нивелирования отсчёты берутся аналогично.

В связи с тем, что взятие отсчёта по рейке цифровым нивелиром не сопровождается появлением субъективных ошибок, то изменение горизонта инструмента можно не производить. Однако в этом случае с целью ослабления влияния ошибок, присущих нивелирам с компенсаторами, необходимо произвести переустановку нивелира по круглому уровню. Например, одним из подъёмных винтов надо вывести пузырёк из нульпункта и вновь вернуть его в исходное положение. Данная программа симметрична по времени наблюдений и по отсчётам. Наблюдатель меняет 5 раз своё положение относительно нивелира. Так как наблюдения начинаются с правой линии, а заканчиваются левой, то из-за влияния перемещения штатива и костылей результаты нивелирования по правой линии будут несколько хуже, чем по левой.

Программа D наблюдения на станции также предусматривает только наличие реек с одной штрих - кодовой стороной. Программа D предусматривает

выполнение нивелирования поочерёдно по двум линиям. Измерения выполняются совместно по двум линиям по ходу часовой стрелки и против её хода (рис. 5) .

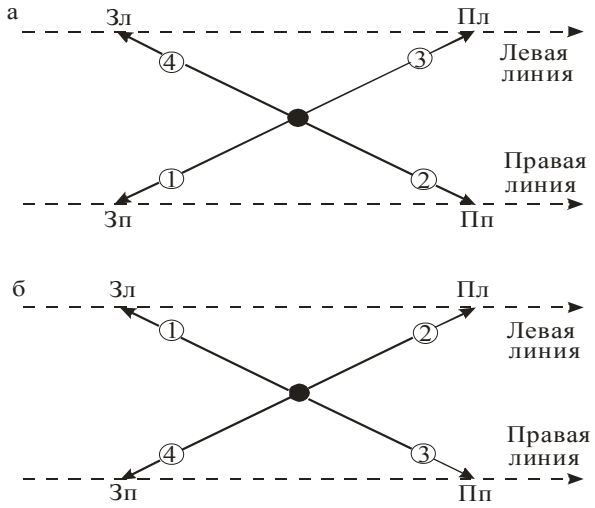


Рис. 5. Последовательность наблюдений на нечётной станции по программе D

Взятие отсчётов по рейкам производится сначала против часовой стрелки, начиная с правой линии, а затем по часовой стрелке, начиная с левой линии. При этом измерения могут производиться как без «замыкания горизонта», так и с «замыканием горизонта», как с изменением горизонта инструмента, так и без изменения.

Такая последовательность взятия отсчётов симметрична во времени, при её применении наблюдатель также 5 раз изменяет своё положение относительно нивелира. Полученные результаты нивелирования по правой и левой линиям будут равноточными, т. к. отсчитывание по рейкам каждой из линий производится поочерёдно. Программа Е наблюдений на станции применяется при наличии реек с одной штрих - кодовой стороной при одном горизонте прибора. В этом случае по правой и левой линиям нивелирования измеряется только по одному превышению и всего два на станции. Данную программу можно применять при небольшой длине линии нивелирования.

При нивелировании II класса могут быть применены три программы наблюдений на станции (табл. 10) [26]. Общим для всех программ является сохранение технологической схемы проложения нивелирного хода в прямом и обратном направлениях.

Таблица 10

Последовательность наблюдений на станции при нивелировании II класса

Программа наблюдений	Станция	Последовательность наблюдения реек на станции	
		Прямой ход	Обратный ход
А (2k)	Нечетная	$З_К$, $П_К$, $П_К^0$, $З_К^0$	$П_К$, $З_К$, $З_К^0$, $П_К^0$

Продолжение табл. 10

	Четная	ПК, ЗК, ЗК0, ПК0	ЗК, ПК, ПК0, ЗК0
В (1k+1ш)	Нечетная	ЗК, ПК, ПШ, ЗШ	ПК, ЗК, ЗШ, ПШ
	Четная	ПК, ЗК, ЗШ, ПШ	ЗК, ПК, ПШ, ЗШ
	Нечетная	$З_К$, $П_К$, $П_К^/$, $З_К^/$	$П_К$, $З_К$, $З_К^/$, $П_К^/$
С (1k+1k)	Четная	$П_К$, $З_К$, $З_К^/$, $П_К^/$	$З_К$, $П_К$, $П_К^/$, $З_К^/$
	Нечетная	ЗК, ПК	ПК, ЗК
D (1k+1k)	Четная	ПК, ЗК	ЗК, ПК

Программа А и В наблюдений на станции предусматривает применение двусторонних штрих - кодовых реек или комбинированных (штрих - кодовая и штриховая сторона). Последовательность взятия отсчёта аналогична существующей программе, применяемой при нивелировании II класса.

Программа С наблюдения на станции применяется при наличии реек только с одной штрих - кодовой стороной, измерения выполняются при двух горизонтах прибора.

Программа D наблюдений на станции применяется при наличии реек с одной штрих - кодовой стороной, нивелирование выполняется при одном горизонте прибора. В этом случае на станции будет измеряться только одно превышение, и, следовательно, данную программу можно применять, как и при нивелировании I класса, при небольшой длине линии.

Так как в настоящее время для выполнения высокоточных работ цифровыми нивелирами фирмы выпускают штрих - кодовые рейки только с одной шкалой, то при условии получения шести разностей d наиболее приемлемыми являются программы наблюдений С и D. С точки зрения симметричности во времени эти программы практически одинаковы, но наблюдения по программе D выполняется быстрее на 10–15 %, могут проводиться с изменением горизонта прибора и без изменения горизонта прибора. С учётом выше сказанного оптимальной программой наблюдений является программа D. При выполнении нивелирования с использованием программы D в основном компенсируются влияния перемещения штатива и изменения угла i на результаты нивелирования [29].

При нивелировании II класса измерения в прямом ходе необходимо выполнять при двух горизонтах прибора. В этом случае будет осуществляться контроль измерений на станции. Рекомендуется применять программу С.

Главным источником систематических погрешностей в высокоточном нивелировании является влияние внешней среды, которое создает два вида погрешностей: тепловое влияние воздействия на нивелир и рейки, действие вертикальной рефракции [30]. Установлено, что они находятся в тесном взаимодействии в зависимости от направления хода. При нивелировании ходов с направлением с запада на восток эти погрешности компенсируются в очень малой степени, поэтому введение поправки δh улучшает результаты нивелирования

$$\delta h = \alpha_{сред.}\left[\Sigma_з\left(t_H^{'} - t_Э\right) - \Sigma_П\left(t_H^{''} - t_Э\right)\right], \qquad (30)$$

где $\alpha_{сред.}$ – средний коэффициент линейного расширения инварных реек;

$t_H^{'}, t_H^{''}, t_Э$ – температура задней и передней реек в момент наблюдения и в момент эталонирования.

Угол i нивелира проверяется и исправляется ежедневно и не должен превышать $10^{''}$.

Опыт работ в горах показывает, что при ослаблении систематических ошибок перемещения костылей и штатива (постоянное или заблаговременное закрепление переходных точек) и тепловых деформаций нивелира крупными источниками ошибок также являются: ошибка из-за неправильного учета температуры нивелирования, ошибка из-за неточного значения коэффициента линейного расширения α, ошибка из-за использования неточного значения длины метра реек.

При изучении вертикальных смещений земной поверхности нивелирные ходы закрепляются грунтовыми и скальными реперами. Реперы несут количественную информацию о движениях поверхности в данной точке. Проведенные исследования по выявлению температурной деформации реперов показали, что скальный репер вносит в результаты нивелирования в солнечную погоду систематическую ошибку $\approx 0{,}1 - 0{,}25$ мм на секцию.

На полигонах Средней Азии более устойчивы в отношении тепловых деформаций грунтовые реперы.

При изучении вертикальных движений земной коры в основном применяются методы высокоточного нивелирования с более жесткими требованиями. В качестве инструментов используются высокоточные оптические нивелиры типа Н-05, Н-1, Ni-004, Ni-002A, Ni-005A (рис.6), а также прецизионные инварные рейки.



Рис. 6. Оптический нивелир Ni 005A

Поскольку большинство геодинамических полигонов расположены в горных условиях, к инварным рейкам предъявляются особые требования. Необходимо знание термического коэффициента расширения рейки, температуры инварной полосы не только в момент эталонирования, но и в момент измерения, необходимо систематически следить за длиной метровых интервалов рейки.

На сегодняшний день на геодезическом рынке цифровые нивелиры представлены рядом фирм, таких как Leica (Швейцария), Sokkia (Япония), Trimble (США). Наиболее распространенными высокоточными цифровыми нивелирами являются нивелиры фирмы Trimble DiNi (рис.7).



Рис. 7. Цифровой нивелир Trimble DiNi 12 и штрих - кодовая рейка

Нивелиры Trimble DiNi являются обновленной модификацией хорошо зарекомендовавших себя цифровых нивелиров фирмы Zeiss. В нивелирах серии Trimble DiNi лучшим образом учтены требования к приборам для современного топографо-геодезического производства: экономическая эффективность при высокой точности, удобство в работе, надежность и цифровой вид предоставления данных.

По сравнению с оптическими нивелирами, нивелиры Trimble DiNi имеют значительно большую точность. Возможность измерения расстояний позволяет быстро выравнивать плечи в нивелирных ходах вперед и назад, обеспечивая высокую надежность результатов, и оптимизируя распределение ошибок. Использование цифровых нивелиров DiNi исключает личные ошибки человека (ошибки при считывании, ошибки записи, ошибки расчётов); все измерения и вычисления производятся автоматически. Нивелир DiNi 11T имеет также тахеометрические функции.

3.2.2.2. Обработка данных повторного нивелирования

Обработка нивелирования на геодинамических полигонах включает два этапа:

Во - первых, обработку отдельных циклов измерений, в результате которой получают не уравненные величины превышений между реперами, отнесенные к эпохе наблюдений.

Во - вторых, сравнение циклов между собой, в результате которого на основании оценки точности выполненных измерений должно быть установлено наличие или отсутствие движения геодезических пунктов во времени.

Обработка отдельного цикла включает вычисление превышений в прямом и обратном ходах, среднего превышения и оценку точности нивелирования. Качество двойного нивелирования характеризуется величинами разностей измеренных превышений в прямом и обратном направлениях и вычислениям по ним средних квадратических ошибок – случайной η и систематической σ на 1 км хода [26].

Если ходы нивелирования одного или двух смежных классов образуют замкнутые полигоны, то подсчитывают их невязки.

По измеренным в нивелировании I класса превышениям определяют следующие разности:

– из правого и левого нивелирования прямого хода

$$d_1 = (h_{прав} - h_{лев})_{прямо}; \tag{31}$$

– из правого и левого нивелирования обратного хода

$$d_2 = (h_{прав} - h_{лев})_{обр}; \tag{32}$$

– из прямого и обратного ходов правого нивелирования

$$d_3 = (h_{прям} - h_{обр})_{прав}; \tag{33}$$

– из прямого и обратного ходов левого нивелирования

$$d_4 = (h_{прям} - h_{обр})_{лев}; \tag{34}$$

– из средних результатов прямых и обратных ходов отдельно для правого и левого нивелирования

$$d_5 = \frac{1}{2}(h_{прям} + h_{обр})_{прав} - \frac{1}{2}(h_{прям} + h_{обр})_{лев}; \tag{35}$$

– из средних результатов прямого и обратного ходов

$$d_6 = \frac{1}{2}(h_{прав} + h_{клле})_{прям} - \frac{1}{2}(h_{прав} + h_{лев})_{обр}. \tag{36}$$

Величины разностей d_1, d_2 и d_6 не должны превосходить ± 3 *мм* $\sqrt{L}$, когда среднее число штативов на 1км хода не превышают 15 и ± 4 *мм* $\sqrt{L}$, когда среднее число штативов на 1 км хода больше 15.

При образовании разностей d превышениям, измеренным в ходе обратного направления, приписывают знаки превышений, измеренных в прямом ходе.

Разности d_i подсчитывают по каждой секции между фундаментальными и узловыми знаками, по результатам нивелирования каждого исполнителя и по всей линии нивелирования.

Для контроля правильности вычисления всех Σd_i следует пользоваться формулами

$$\Sigma d_5 = \frac{1}{2}(\Sigma d_1 - \Sigma d_2), \tag{37}$$

$$\Sigma d_6 = \frac{1}{2}(\Sigma d_3 + \Sigma d_4). \tag{38}$$

По величинам d_i анализируют действие случайных и систематических ошибок. При сопоставлении действительных величин Σd_i с теми значениями, которые обусловлены действием только случайных ошибок, используют формулы

$$m_1 = \pm 1.2mm\sqrt{L} \text{ (для } d_1, d_2, d_3, d_4), \tag{39}$$

$$m_2 = \pm 0.84mm\sqrt{L} \text{ (для } d_5, d_6). \tag{40}$$

С целью получения представления о характере и величине систематических ошибок для каждой линии нивелирования I класса строят графики накоплений величин d_i [24, 31].

Для построения графика проводят две взаимно перпендикулярные линии, которые принимают за оси координат; по оси абсцисс откладывают расстояния между постоянными знаками, по оси ординат – величины: $\Delta_1 = d_i$; $\Delta_2 = d_{i1} + d_{in} \ldots$; $\Delta_n = d_{i1} + d_{i2} + \ldots + d_{in}$.

Соединяя полученные точки линиями, получают график накоплений величин d_i.

Для каждой линии нивелирования I класса строят два графика: на одном показывают накопления разностей d_1, d_2, d_5, на другом – d_3, d_4, d_6. На рис. 8

показаны графики накопления величин d_1, d_2, d_5 на Аксайском профиле Алматинского ГДП.

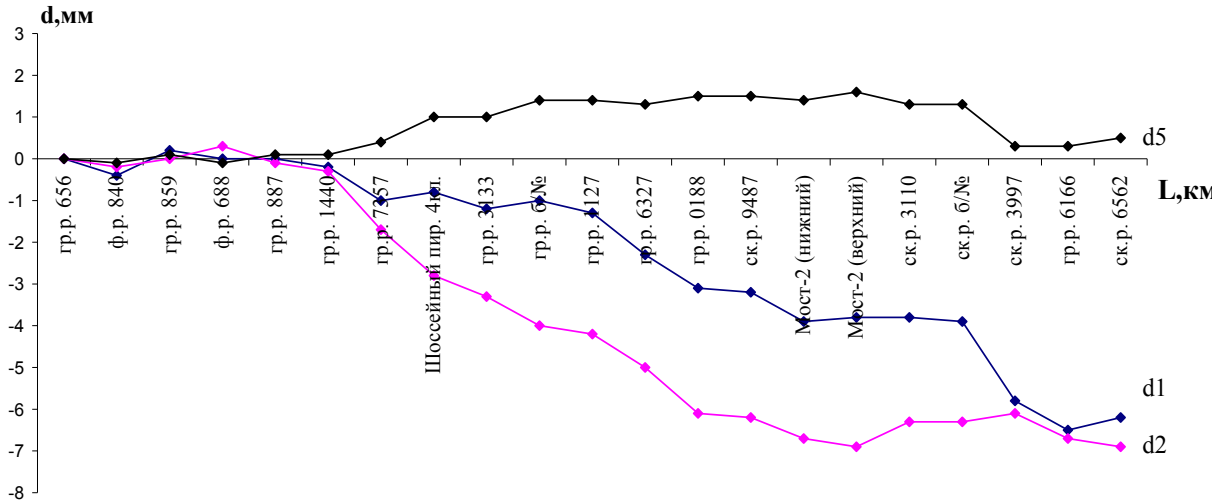


Рис.8. График накопления величин d_1, d_2, d_5 на Аксайском профиле

По измеренным в нивелировании II класса превышениям в прямом и обратном ходах вычисляют разности d, которые не должны превышать ± 5 *мм* $\sqrt{L}$, когда среднее число штативов на 1км хода меньше 15, и ± 6 *мм* $\sqrt{L}$, когда среднее число штативов на 1 км хода более 15.

Возможное накопление случайных ошибок в разностях d нивелирования II класса подсчитывают по формуле

$$m = \pm 1.7 \text{ мм } \sqrt{L}\,. \qquad (41)$$

Построение графика накопления величин d производят так же как в нивелировании I класса.

Среднюю квадратическую случайную ошибку η среднего превышения на 1 км для нивелирного хода I класса вычисляют по формулам

$$\eta^2 = \frac{1}{4n}\left[\frac{d^2{}_5}{r}\right] \qquad (42)$$

и

$$\eta^2 = \frac{1}{4n}\left[\frac{d^2{}_6}{r}\right], \qquad (43)$$

а для нивелирного хода II класса –

$$\eta^2 = \frac{1}{4n}\left[\frac{d^2}{r}\right], \qquad (44)$$

где n – число секций в ходе, r – длина секций, d – разность превышений двух нивелировок в секции.

Среднюю квадратическую систематическую ошибку σ среднего превышения на 1 км нивелирного хода I и II классов вычисляют по формуле

$$\sigma^2 = \frac{1}{4[L]}\left[\frac{S^2}{L}\right]. \qquad (45)$$

Величины S берут с графика как разности ординат прямой проведенной на графике симметрично относительно кривой однородного накопления разностей на соответствующем участке.

Для нивелирования подсчитывают невязки полигонов, в которые входят линии вновь исполненного нивелирования.

Невязки нивелирных полигонов I и II классов должны подсчитываться в системе нормальных высот, т. е. по превышениям, исправленным поправками за переход к нормальным высотам.

Допустимые величины невязок полигонов, образованных линиями нивелирования I и II классов, не должны превышать значений (в миллиметрах):

$$W_{доп} = \sqrt{25(L_I + L_{II}} \ . \qquad (46)$$

Выполняют оценку точности нивелирования по невязкам полигонов. Средние квадратические погрешности нивелирования по невязкам полигонов вычисляют по формуле

$$\mu = \pm\sqrt{\frac{1}{N}\left[\frac{W^2}{P}\right]}, \qquad (47)$$

где N – число полигонов; W – невязка полигона; P – периметр полигона.

Окончательные результаты обработки геодезических данных принято представлять в виде графиков, векторных схем смещений пунктов плановых сетей и, наконец, в виде карт скоростей (или градиентов скоростей), отображающих площадные закономерности современных вертикальных движений исследуемой территории.

Непосредственно измеренные величины превышений между реперами, получаемые из отдельных циклов измерений, используются при составлении двух видов графиков по линиям повторного нивелирования:

– графиков накопления разностей превышений между циклами повторного нивелирования;

– пространственно-временных графиков смещений и скоростей вертикальных движений.

При этом графики накопления разностей превышений являются первичными графическими материалами, которые наряду с результатами нивелирования содержат данные о рельефе. Это позволяет использовать их, как самостоятельный технический документ при интерпретации нивелирных данных.

Основными требованиями при составлении графиков накопления разностей превышений являются максимально возможные информативность и наглядность. Поскольку циклы повторного нивелирования зачастую значительно разнесены во времени и охватывают период в несколько десятков лет, то использование единой начальной эпохи при вычислении разностей превышений между циклами и изображение их на графиках сопряжено с существенной потерей информации из-за неизбежной утраты нивелирных знаков. Поэтому на графиках, в первую очередь, должны изображаться накопления разностей превышений между хронологически смежными циклами.

При построении графиков этих разностей на горизонтальной оси отмечается местоположение реперов относительно начального репера для данной линии, указывается их номер и тип, а по вертикальной оси откладываются величины разностей превышений. Графики строятся друг над другом снизу вверх в хронологическом порядке.

Кроме этих графиков, для иллюстрации характера накопления разностей превышений между циклами составляются графики накопления этих разностей относительно единой эпохи, за которую следует принимать нивелирование, выполненное в первом цикле [31].

В табл. 11 дан образец вычисления разности превышений на Аксайском профиле Алматинского ГДП. По полученным данным построен график накопления разностей превышений (рис.9).

Для характеристики физико-географических и сейсмо-тектонических условий вдоль трассы нивелирования под графиками могут приводиться следующие иллюстративные материалы:

– гипсометрический профиль трассы;

– схематическое изображение полосы местности по обе стороны от трассы нивелирования, изображаемой в виде прямой, проходящей посередине полосы. На полосе, имеющей ширину 3 см, изображаются пересекающие трассу разломы земной коры, положение которых установлено по геолого-геофизическим данным, а также реки, железные и шоссейные дороги.

Указанное ниже представление результатов нивелирования наиболее целесообразно, когда число выполненных циклов менее 5–6. Это типично для нивелирных линий большой протяженности. Для локальных построений на ГДП или отдельных аномальных участках, где измерения выполняются с большой частотой, такое графическое представление довольно громоздко. В этих случаях наиболее адекватной формой совместного представления результатов нивелирования всех циклов являются пространственно-временные графики (ПВГ) вертикальных смещений и скоростей реперов.

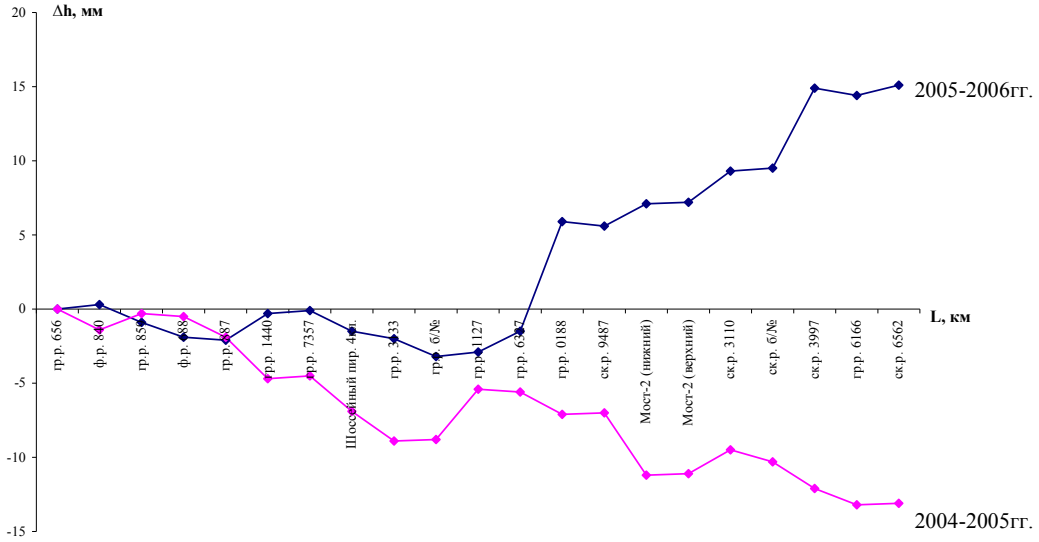


Рис.9. График накоплений Δh на Аксайском профиле

Таблица 11

Вычисленные разности превышений на Аксайском профиле

№ репера	Название репера	Расстояние между реперами, км	Среднее превышение h, мм			Разности превышений, мм		Накопление Δh, мм	
			III цикл (2004г.)	IV цикл (2005г.)	V цикл (2006г.)	IV - III	V-IV	IV - III	V-IV
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	656, грунт. реп.							0	0
		1,0	3,0908	3,0911	3,0897	0,3	-1,4		
2	840, фунд. реп.							0,3	-1,4
		1,2	19,1410	19,1398	19,1409	-1,2	1,1		
3	859, грунт. реп.							…..	…..

Идея ПВГ была предложена японским геофизиком Т. Цубои. ПВГ являются, по существу, графическим изображением в виде изолиний данных прямоугольной таблицы, в которой для каждого цикла измерений выписаны в виде отдельных строк изменения превышений реперов относительно единого исходного цикла.

На горизонтальной (пространственной) оси графика откладываются в масштабе расстояния между смежными реперами и обозначен тип репера. На вертикальной (временной) оси графика отмечены эпохи нивелирования каждого цикла. Против каждой отмеченной на вертикальной оси эпохи наблюдений выписываются в строку изменения превышений (в мм) каждого репера относительно исходного, происшедшие со времени выполнения первого цикла. Для начального цикла такие изменения у всех реперов равны нулю.

Интерполируя линейно между выписанными значениями вертикальных смещений, проводят их изолинии с сечением 2 мм.

По результатам данных повторного нивелирования составляются карты СВДЗП. Исходным материалом для составления карт СВДЗК чаще всего служат комплексные данные: повторного нивелирования, уровнемерных наблюдений, геолого-геоморфологического анализа, реже одни только геодезические измерения. По своему содержанию карты этого типа являются наиболее информативными и распространенными. Они дают качественную и количественную характеристику полей современных движений, их площадную дифференциацию, интенсивность, направленность, что обеспечивает возможность широкого использования этих карт смежными науками о Земле.

Существуют довольно упрощенные карты скоростей движений, на которых даны скорости движения отдельных реперов. По существу это карты фактического материала, который может быть использован в дальнейшем для составления карт полей современных движений.

Результаты определения фоновых компонент движений реперов графически оформляются в виде карт скоростей СВДЗК [32]. Как правило, карты должны составляться в масштабе 1: 500 000 с высотой сечения изолиний 1 мм/год, или выбранной исходя из величины скорости.

Для удобства интерполяции параметров движения на этих картах наносятся основные элементы, характеризующие сейсмо-тектонические условия на территории полигона (разломы, эпицентры землетрясений).

Для построения карты скоростей необходимо определить скорость движения каждого репера полигона в единой системе высот от одного репера, принятого за исходный (неподвижный) [33, 34, 35, 36].

Вычисленные Δh между двумя циклами приводятся в соответствие с исходным репером. Для этого на схеме нивелирного полигона, на которой обозначены линии его составляющие, у каждой линии рисуются стрелки по ходу часовой стрелки от исходного репера. Если стрелка ходов совпадает с направлением стрелки, выходящей из начального репера линий, то все разности превышений берутся со своим знаком. Если нет, то знаки Δh этой линии меняются на обратные. Проделав такую процедуру по всем полигонам, получаем упорядоченные по знаку Δh относительно исходного репера.

Затем подсчитывается сумма всех разностей Δh по полигону. Теоретическая сумма разностей Δh в замкнутом полигоне равна 0. Практически она будет отлична от нуля. Полученную невязку разбрасывают на каждый репер с обрат-

ным знаком пропорционально расстоянию. Получают исправленные Δh, по которым вычисляют скорость каждого репера. Скорость исходного репера равна 0.

Относительные скорости движения реперов определяются как разности превышений между отдельными циклами нивелировок, деленные на интервал времени между ними.

$$v = \frac{h_2 - h_1}{\Delta T}, \tag{48}$$

где ΔT – интервал времени между нивелировками.

Средние квадратические погрешности скоростей вычисляются по формуле

$$m_v = \frac{\sqrt{(m_1^2 + m_2^2)S}}{\Delta T}, \tag{49}$$

где m_1, m_2 – средние квадратические погрешности сравниваемых нивелировок, вычисляемые либо по данным предварительной оценки точности, либо по полученным разностям превышений в прямых и обратных ходах, либо по невязкам в полигонах; S – расстояние между реперами (км).

Расчет скорости вертикальных движений земной поверхности приведен в табл. 12.

Таблица 12

Расчет скоростей вертикальных движений земной поверхности

№ секции	№ (название) и вид пункта	Расстояние, км	Измеренные превышения, м		Исправленные превышения, м		Δh, мм	V, мм/год
			2006 г.	2005 г.	2006 г.	2005 г.		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	гр.р. 887							0
1		0,5	0,3996	0,4024	0,3997	0,4022	–2,5	
	гр.р. 1440							–2,5
2		3,7	–0,2848	–0,2850	–0,2847	–0,2852	0,5	
	гр.р. 7357							–2,0
3		3,7	19,8866	19,8890	19,8867	19,8888	–2,1	
	Шоссейный пир. 4 кл							–4,2
4		0,8	5,5492	5,5512	5,5493	5,5510	–1,7	
	……..							……
23		3,6	–16,2442	–16,2430	–16,2441	–16,2432	–0,9	
сумма			–0,003	0,0035	0	0	0	
f			–0,00013	0,000152				

Скорости движений реперов можно рассчитать, используя их высоты. При этом высоту исходного репера считаем неизменной на протяжении всего периода исследований на ГДП. Относительно этой высоты вычисляются отметки всех остальных реперов полигона по формуле

$$H_i = H_{исх.} + h_{исх.i}\,, \tag{50}$$

где H_i – отметка репера полигона; $H_{исх.}$ – отметка исходного репера; $h_{исх.i}$ – превышение между отметкой репера полигона и отметкой исходного репера.

Вычислив отметки всех реперов полигона переходят к вычислению скоростей этих реперов между двумя эпохами наблюдений по формуле

$$v = \frac{H_2 - H_1}{\Delta T}\,, \tag{51}$$

где H_1 и H_2 – отметки одной и той же точки, полученные по результатам соответственно первого и второго циклов нивелирования.

Мерой наклона земной поверхности является горизонтальный градиент скорости ее вертикального движения вычисляемый, по формуле

$$qrad\ v = \frac{v_A - v_B}{l_{AB}}\,, \tag{52}$$

где l_{AB} – расстояние между изолиниями, проходящими через точки А и В.

На рис. 10 показана карта скоростей современных вертикальных движений Северного Тянь-Шаня [36].

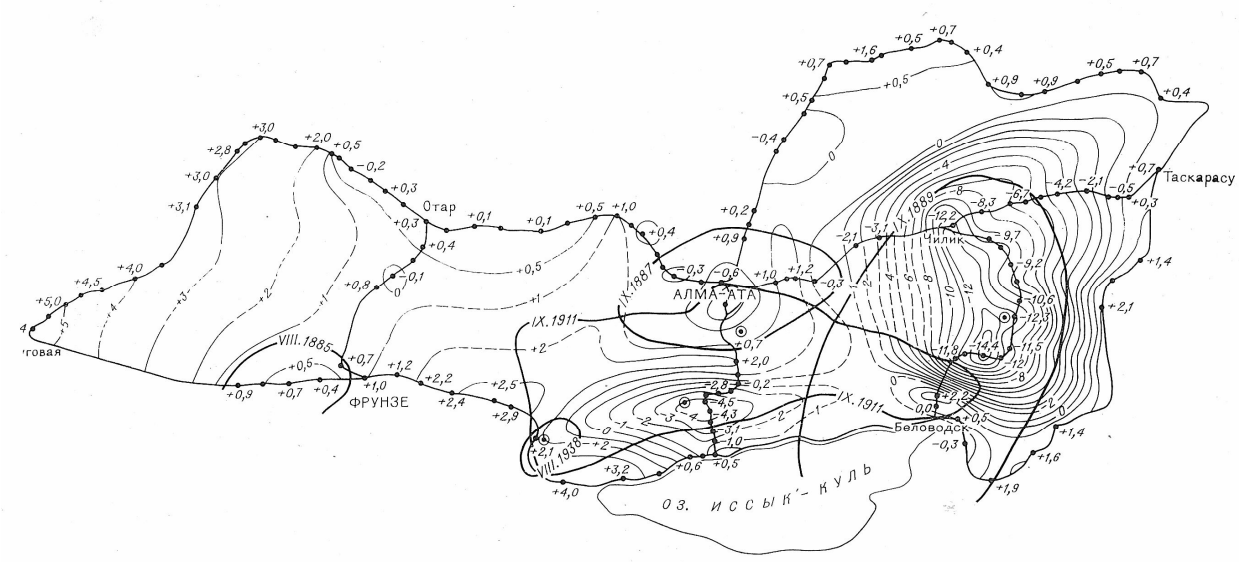


Рис. 10. Скорости современных вертикальных движений Северного Тянь-Шаня

3.2.3. Краткая характеристика прогностических геодинамических полигонов в Республике Казахстан

Территория Южного и Юго-Восточного Казахстана одна из наиболее сейсмоопасных территорий в бывшем СССР. На данной территории произошло свыше 15 разрушительных землетрясений с магнитудой 6 баллов, причинивших значительный ущерб, и большое количество слабых землетрясений [37]. Наиболее сильными землетрясениями являются Беловодское (1885 г.), Верненское (1887 г.), Чиликское (1889 г.) и Кеминское (1911 г.) землетрясения. Эпицентр Верненского землетрясения располагался на северном склоне Заилийского Алатау в 10–15 км к югу от г. Верный. Эпицентральная область вытянута вдоль гор и нарушения охватывали район 35 км в длину при ширине 5 км. В этой области образовалось большое количество трещин до метра шириной, целые скалы обрушились в долины и ущелья. Оползни, сбросы, сдвиги и обвалы были столь грандиозны, что засыпали долины на протяжении 8–10 км при ширине 400–500 м и мощностью покрова в 60 м. В Верном были разрушены все каменные дома. За 6 месяцев после основного толчка наблюдалось 600 повторных толчков силой 5–6 баллов. Чиликское землетрясение считается одной из грандиозных катастроф Средней Азии. Область всеобщих разрушений охватила части хребтов Заилийский и Кунгей-Алатау и простиралась от реки Или до берегов озера Иссык-Куль. На огромной площади возникли трещины шириной в 4–5 м при длине до 1 км. Кеминское землетрясение по силе превосходило все предшествующие. Площадь остаточных поверхностных деформаций в субширотном направлении достигала 200 км, субмеридианном – 50 км. Наблюдались вертикальные перемещения до 10 м по многочисленным разрывам. В городе Верном величина вертикальных смещений вдоль трещин достигала 3 м. Сейсмичность района связана главным образом с разрывными нарушениями, являющимися одной из существенных форм проявления деформаций земной коры. Система крупных глубинных разломов первой категории прослеживается на сотни километров и ограничивает крупные блоки земной коры. Для г. Алматы наибольшую опасность представляет Заилийская зона разломов, где максимальная магнитуда возможного землетрясения оценивается в 7.5 балла. В связи с этим в 1970 г. принято постановление «Об упорядочении строительства в сейсмических районах страны», в котором было намечено в 1971–1972 гг. создание Регионального (Большого) полигона и (Малого) Алматинского геодинамического полигона. Главной задачей первого является определение современной вертикальной подвижности основных геоструктурных элементов района.

Региональный полигон занимает площадь в 60 тыс. км^2 и включает максимальные изосейсты сильнейших землетрясений прошлых лет. Границы полигона определены с учетом существующих линий высокоточного нивелирования и установлены на основе анализа карт сейсмичности, положения изосейт происшедших в этом районе крупнейших землетрясений, расположения зон глубинных разломов и геолого-морфологического строения территории.

В период с 1935 по 1956 г.г. на региональном полигоне произведена нивелировка общей протяженностью 2500 км. В 1970–1972 гг. нивелирование этих трасс провели повторено. На севере граница полигона ограничена железной дорогой станция Луговое – Сары – Озек, с юга – станция Луговая, вдоль северного побережья озера Иссык-Куль и замыкается на западных отрогах Джунгарского Алатау. Густота нивелирных линий обеспечивает решение главной задачи полигона – определение СДЗП основных геоструктур. При повторном нивелировании Большого полигона отмечены аномальные скорости вертикальных движений в районе Чилика и Чон-Кемина, где в последующем были развернуты микрополигоны и линейно-угловые сети. Включенная в исследования сейсмоопасная территория Северного Тянь-Шаня (более 60 тыс. км^2) на юге ограничена оз. Иссык-Куль, на севере – линией железной дороги Луговая – Алма-Ата – Сары - Озек.

В геолого-морфологическом отношении территория регионального полигона включает в себя Чуйскую и Илийскую впадины, разделенные слабо поднятыми Чу-Илийскими горами, крупнейшие хребты Северного Тянь-Шаня – Заилийский и Кунгей Алатау и западные отроги Джунгарского Алатау. Тектоническое строение характеризуется большим числом разломов, главные из которых Заилийский, Джалаир-Найманский, Северо-Иссык-Кульский и Малайсаринский.

Исходное нивелирование линий Большого полигона по точности отнесено к нивелированию II класса. В последующие годы нивелирование осуществлялось по программе I и II классов с использованием нивелиров Ni-004, Koni – 007, НА -1, Н-05 и 3-х метровых инварных реек. Нивелирные линии пересекают большое число разломов и проходят вблизи эпицентров крупнейших землетрясений. Наиболее спокойный из всего регионального полигона в сейсмическом отношении район города Отара. Максимальная положительная скорость относится к предгорным долинам, примыкающим к Киргизскому хребту (5.4 мм). Для большей части Илийской впадины характерно опускание со скоростью до 12 мм в год.

Для изучения СДЗП, предвестников крупных землетрясений и усовершенствования методики наблюдений СДЗП в Казахстане в 1971-1972 г.г. началось создание (Малого) Алматинского полигона. Алматинский полигон расположен на шарнирном сочленении блоков низкогорья северного склона хребта Заилийский Алатау с одной стороны и глубокой Алматинской впадины с другой стороны и территориально совпадает с городом Алматы. Территория полигона разбита на крупные структурные единицы Алматинским, Заилийским, Боролдайским и другими глубинными разломами, связанными с разломами высших порядков. Сами блоки имеют систему разрывов. Площадь малого Алматинского геодинамического полигона составляет 400 км^2.

На полигоне систематически ведутся наблюдения за вертикальными и горизонтальными движениями, широким арсеналом средств. Нивелирная сеть полигона представляет собой систему меридианальных трасс, замкнутых субширотными ходами и образует 12 полигонов, покрывающих площадь 200 км^2.

Нивелирные построения базируются на государственных нивелирных линиях, специально созданных для изучения современных движений земной поверхности на отдельных полигонах и профилях. Общая протяженность нивелирных линий, начинающихся на севере в Илийской впадине на широте с. Дмитриевка и заканчивающихся на юге ходами по ущельям рек Малая и Большая Алматинка на широте Медео, составляет более 200 км, где фундаментально закреплено более 200 реперов. Минимальное расстояние между точками составляет 200 м, максимальное – 3,2 км. Кроме того, территорию Алматинского геодинамического полигона пересекают 11 основных профилей. Профили полигона ориентированы в крест простирания тектонических разломов. Наиболее протяженными являются Талгарский и Аксайский профили. Аксайский и Котурбулакский профили созданы в 1979 г. и имеют общую протяженность 27,2 км и 21,2 км соответственно. Талгарский профиль в 1968 г. был продлен на север и юг и имеет протяженность 21,8 км. Аксайский профиль является одним из основных профилей на Алматинском геодинамическом полигоне (рис.11).

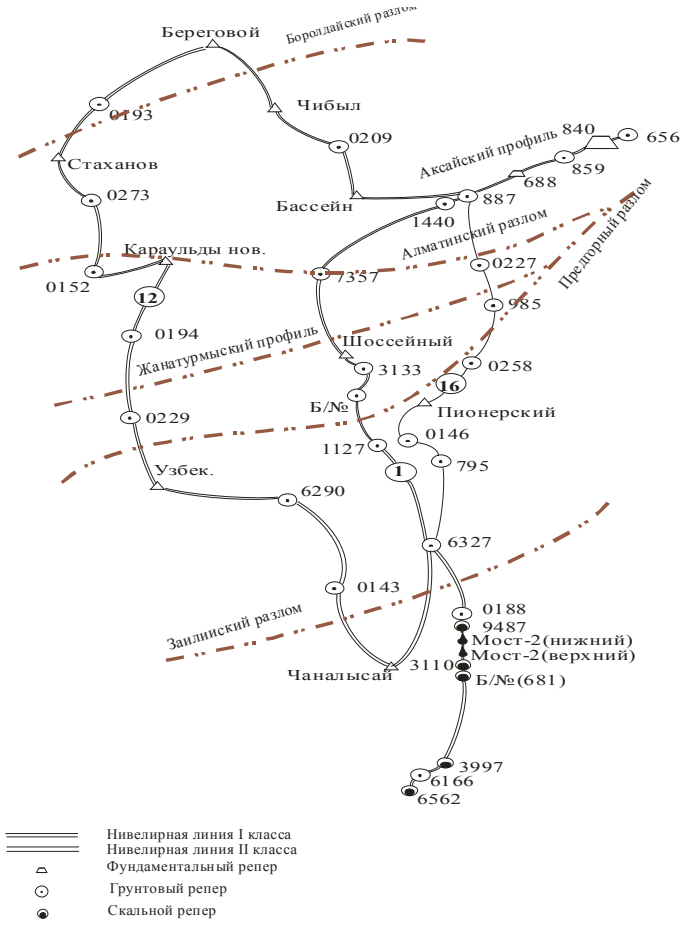


Рис. 11. Схема нивелирных линий Аксайского профиля

В пределах Приалматинского сейсмического района выделено четыре таких участка, на трех из которых заложены нивелирные профили. Нивелирный профиль начинается на Боролдайском поднятии и, следуя вдоль русла реки Большой Алматинки до её коленчатого изгиба, пересекает почти в крест простирания основную сейсмогенную систему разрывных нарушений, в том числе Заилийский и Алматинский разломы и эпицентральную зону Верненского землетрясения (1887 г.).

Две линии II класса протяженностью 6,5 км и 15,5 км, опирающиеся на пункты Аксайского профиля – грунтовый репер 887 и грунтовый репер 6327, образуют два замкнутых полигона (рис. 12).

Геодезические работы на Алматинском полигоне выполняются методом повторного нивелирования I и II классов. К настоящему времени выполнено около 50 циклов нивелирования I и II класса. При производстве нивелирования I и II классов в 2007 г. на Алматинском геодинамическом полигоне применялся высокоточный нивелир Ni 005A и односторонние 3-х метровые инварные рейки РИ-3000.

Для изучения горизонтальных движений на Алматинском полигоне развита сплошная линейно-угловая сеть. Она содержит 21 пункт, охватывает южную часть Илийской впадины, предгорную наклонную равнину и прилавки хребта Заилийский Алатау. Пункты расположены на разных тектонических блоках. Из сети можно выделить две цепочки: одна имеет направление вдоль предгорий и пересекает 7 тектонических блоков, вторая – вдоль предгорий и пересекает 5 блоков. Для исключения возможных ошибок, обусловленных построением большой сети, построено 3 локальных четырехугольника со сторонами 2.2 – 5.4 км.

Пункты существующей линейно-угловой сети Алматинского ГДП могут служить каркасом при реконструкции Алматинской городской геодезической сети с использованием спутниковых технологий [38]. Как известно, СКП измерения углов на ГДП колеблются в пределах 0.5–1.0", что в линейной мере составляет 3–5 см на 10 км. Точность измерения сторон светодальномером СГ -3, равна 1.5×10^{-6} или 1.5 см на 10 км. Кроме того, линейные измерения более оперативны и прогресс линейных измерений идет более быстрыми темпами, чем угловых. Таким образом, при наземных наблюдениях сети следует отдать предпочтение линейным измерениям при максимально возможном отказе от угловых измерений.

В середине 1973 г. в эпицентральной зоне Чиликского (1889 г.) землетрясения была заложена линейная сеть – Шелекский (Алгабасский) полигон. Линейно-угловое построение на Шелекском ГДП выполнены так, что часть пунктов находятся по одну сторону наиболее крупных разрывных нарушений, часть по-другую. Таким образом, появилась возможность разделить движение земной поверхности, связанные с эндогенными и экзогенными факторами. В сентябре 1976 г. была выполнена привязка Шелекского геодинамического полигона к существующей государственной триангуляции 2 класса. Для передачи дирекционного угла были выполнены наблюдения на пункте Пшукнура.

Сеть представляет собой два четырехугольника, наложенных друг на друга и опирающихся на одну общую сторону. В 1974 г. Алгабасская сеть была расширена на север путем заложения двух трехсторонников, опирающихся на ту же общую сторону. После расширения сеть как бы связала воедино три крупные геологические структуры, расчлененные тектоническими разломами.

Измерение углов в сети полигона выполнялось по программе 1 класса высокоточным теодолитом Т-05, длины линий измерялись светодальномерами «Кварц» и «Геодиметр», «Дистомат DI 3000 S». Для определения базовых линий в плановой геодезической сети 1 класса на Шелекском ГДП в 2005 г. были выполнены спутниковые наблюдения с использованием GPS – аппаратуры.

Анализ наблюдений показал, что процесс деформирования территории Алматинского полигона как единого блока в горизонтальной плоскости носит знакопеременный характер: растяжения сменяются интенсивным сжатием, затем наступает полное отсутствие деформаций, затем опять сжатие.

На территории Республики Казахстан планомерные исследования современной геодинамики геодезическими методами ведутся также на Талгарском и Жамбылском геодинамических полигонах. В административном отношении последний расположен на территории города Тараз и его пригородах, часть линий проходит по территории Кыргызской Республики. Проведенные работы по повторному нивелированию I и II классов позволили получить данные о характере современных вертикальных движений земной коры на геодинамическом полигоне за период времени: по линии нивелирования I класса – 50 лет; нивелирования II класса – 18, 20 лет. В местах пересечения тектонических разломов линиями нивелирования I и II классов сохранились ранее выявленные изменения вертикальных движений земной коры, что свидетельствует о тектонической активности Южножамбылского и Жамбылского разломов, определенных геофизическими методами.

В 2006 г. в Восточно-Казахстанской области создан Зайсанский геодинамический полигон.

Схема расположения геодинамических полигонов в Северном Тянь-Шане показана на рис. 12.



Условные знаки

Линии нивелирования I и II классов прежних лет

Линейно-угловые измерения прошлых лет

○ Грунтовый репер

△ Фундаментальный репер

Ненайденный репер

Рис. 12. Схема расположения геодинамических полигонов в Северном Тянь-Шане

4. СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗУЧЕНИЯ ОПАСНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

4.1 Определение СДЗП с использованием спутниковых навигационных систем

В последние несколько лет наряду с традиционными геодезическими наблюдениями используются методы спутниковой геодезии. Комбинирование традиционных наземных и спутниковых измерений позволяет достаточно успешно решать задачи определения СДЗП. Спутниковые технологии, благодаря своей высокой производительности, позволили с высокой периодичностью получать информацию о деформациях земной поверхности на базах от первых метров до нескольких десятков километров, что было затруднительным при использовании традиционных методик измерений [39]. Определения величин смещений и деформаций производятся путем многократных переопределений координат пунктов или высот реперов и геометрических элементов – углов, длин и превышений.

Международной геодинамической службой (МГС) выполняется глобальный мониторинг земной поверхности средствами GPS [40]. МГС была организована в 1993 г. Международной ассоциацией геодезии (МАГ) для объединения мировых постоянных сетей слежения за спутниками GPS в единую сеть. В настоящее время действуют около 50 основных станций. Плотность сети неравномерная: наибольшая в Западной Европе, США. Наличие глобальной сети станций, поддерживающих систему INRF (Международная земная система координат), позволяет оперативно определять координаты в любой точке земного шара со средними квадратическими погрешностями 2–3 см в плановых координатах и около 5 см в высоте. После получения серий координат, относящихся к различным эпохам наблюдений, могут быть вычислены скорости движения тектонических плит.

GPS- технологии стали основным средством наблюдений при построении глобальных, региональных и локальных геодинамических сетей. Примером региональных сетей могут служить Южно-Калифорнийская объединенная GPS – сеть, включающая 250 непрерывно-наблюдаемых пунктов, сеть SCIGN, расположенная в районе активного взаимодействия Северо-Американской и Тихоокеанской тектонических плит, а также сеть Японии, включающая почти 1000 пунктов со средними расстояниями до 30 км. К региональным геодинамическим сетям относится геодинамическая сеть Центральной Европы, включающая 31 станцию из 11 стран, Альпийская геодинамическая сеть, располагающаяся на территории северной Италии, восточной Франции, Швейцарии и Австрии. Региональные геодинамические сети созданы на районы Восточной России, Байкала, Алтая и Саян.

Построенная на основании данных [40] глобальной GPS-сети карта векторов движения основных блоков Евро-Азиатского континента (рис. 13) пока-

зывает, что генеральным направлением движения Европейской части континента является северо-восточное.

По мере продвижения станций на восток северная составляющая движения уменьшается, и приблизительно на долготе Новосибирска направление движения меняется на южное. Движение крайних точек континента имеет явно выраженное юго-западное направление, т. е. наблюдается вращение Евро-Азиатского континента вокруг точки, расположенной в пределах горного массива Гималаи – Тибет. В северной части сейсмически активного треугольника, ограниченного разломами Памира – Байкала и северо-восточного Китая, действует сеть GPS- наблюдений. Она охватывает территорию Тянь-Шаня, Казахского щита, горных систем Джунгарии, Тарбагатая, Алтая. Установлено, что общее сжатие поперек киргизской части Тянь-Шаня происходит в долготной полосе 75–76 со скоростью 13 мм/год. Особенно быстрое накопление деформаций выявлено вдоль восточного края бассейна озера Иссык-Куль – 7 мм/год на расстояниях менее 20 км, что может служить предвестником землетрясения.

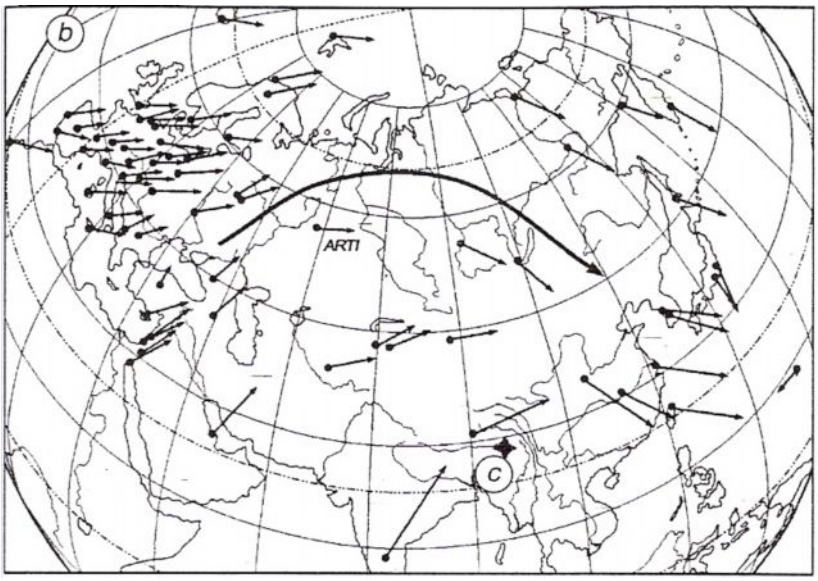


Рис.13. Векторы движений основных блоков Евро-Азиатского континента

Локальные геодинамические сети строятся на месторождениях для контроля деформаций земной поверхности в процессе эксплуатации месторождения. Они используются для определения среднего уровня морей, для мониторинга вулканов и сейсмически активных районов, для изучения вопросов экологии.

Применение современных методов спутниковой геодезии для наблюдений за процессом деформаций земной поверхности позволяет проводить исследования на качественно более высоком уровне. Измерения, проводимые с использованием современных геодезических комплексов, показали свою высокую эффективность для решения задач геодинамики, благодаря чему стали возможными не только дискретные измерения, но и регулярный мониторинг деформаций и напряжений, происходящих в земной коре.

Однако, GPS - наблюдения в настоящее время не дают точность в определении высот равную точности нивелирования I и II классов, и поэтому последние остаются основными методами определения вертикальных движений земной поверхности**.**

4.2. Общая структура и состав спутниковых навигационных систем

Изучение СДЗП требует проведения в мониторинговом режиме высокоточных геодезических измерений смещений реперов специально оборудованных геодинамических полигонов. Жесткие требования к проведению таких работ – обширные территории, охватываемые измерениями, высокий уровень точности определения величин сдвижений и деформаций, короткие периоды между сериями инструментальных измерений, все это предопределяет необходимость использования при проведении исследований современного высокоточного и производительного геодезического оборудования. В последние годы наряду с традиционными геодезическими наблюдениями используются методы спутниковой геодезии. Спутниковые технологии благодаря своей высокой производительности позволяют с высокой периодичностью получать информацию о деформациях земной поверхности на базах от первых метров до нескольких десятков километров.

При достижении точности порядка 1–2 $\times 10^{-7}$ на расстояниях 5–15 км наблюдения с GPS-системой могут быть эффективно использованы для оценки деформаций различных объемов геологической среды.

Результаты повторных наблюдений дают полную картину распределения вертикальной и горизонтальной компонент движений и деформаций на исследуемой территории, в соответствие с масштабом наблюдений. С помощью этого метода осуществляется долговременный контроль за современными деформационными процессами на площади геодинамического полигона для оценки текущего геодинамического состояния крупных блоков земной коры и современной активности региональных разломов.

При исследовании геодинамических процессов с применением GPS-технологий, в основном используются два пространственно-временных режима – разовое переопределение исходных координат пунктов ГГС и опорных геодезических сетей, и измерение величин смещений и деформаций в мониторинговом режиме. Наиболее часто при выполнении продолжительных исследований находит применение комбинированный режим, когда при выполнении нулевого цикла работ переопределяются исходные координаты пунктов наблюдательной станции, а при выполнении последующих циклов измерений определяются смещения и деформации, произошедшие за определенный период времени.

Современные спутниковые навигационные системы (СНС) используют в основном радиотехнические наблюдения на основе эффекта Доплера. Сущность наблюдений на основе эффекта Доплера состоит в следующем. Бортовой передатчик ИСЗ излучает радиосигнал УКВ – диапазона (этот диапазон наибо-

лее удобен для работы СНС). Специальный приемник, находящийся на пункте наблюдений, принимает это сигнал, и частота принятого сигнала сравнивается с частотой сигнала эталонного генератора приемника, равной частоте бортового передатчика КА. Так как последний находится в движений, между частотой его передатчика и принимаемой приемником частотой, в соответствии с эффектом Доплера, образуется разность Δf (f – частота)

$$\Delta f = f_2 - f_1 = -V_r / \lambda \quad , \tag{53}$$

где $V_r = \delta r / \delta t$ – радиальная скорость перемещения КА; λ – длина волны передатчика; f_1, f_2 – частоты приемника и бортового передатчика.

Технология спутниковой навигации основана на приеме сигналов, поступающих от спутников, и вычислении расстояния между спутником в момент излучения и приемником в момент приема. Регистрируя время прохождения радиосигнала, и, зная скорость его распространения, легко определить расстояние до источника излучения. Для вычисления координат (широты и долготы) приемника на поверхности земли необходимо одновременно определять расстояние до трех навигационных спутников. При приеме сигналов от четырех спутников можно вычислить также высоту объекта над уровнем моря. Положение спутников на орбитах должно быть известно в любой момент времени. Помимо этого для правильного вычисления координат необходима точная временная привязка и синхронизация часов на спутниках и в навигационных приемниках. На спутники устанавливают атомные часы, имеющие точность около одной наносекунды. Для корректировки хода часов навигационных приемников используются специальные алгоритмы обработки сигналов, одновременно поступающих от четырех спутников.

В настоящий момент в мире функционирует две крупные спутниковые навигационные системы американская «NAVSTAR» (или GPS -Global Positioning System) и российская «ГЛОНАСС» (Глобальная Навигационная Спутниковая Система). Также на стадии разработки находиться и третья Европейская спутниковая навигационная система «Галилео», способная обрабатывать сигналы как GPS, так и ГЛОНАСС, в этом случае система работает как одно целое. Одним из существенных параметров данной системы является целостность информации. Если данные любого из спутников вызывают сомнения, они должны быть исключены из расчетов. При совместном использовании GPS/ ГЛОНАСС появляется возможность обеспечить контроль целостности сигналов, поступающих от спутников, и переход на работу с теми сигналами, целостность которых подтверждена. Приемники системы «Галилео» смогут работать как в GPS, так и в ГЛОНАСС, обеспечивая в реальном времени метровую точность позиционирования в абсолютном режиме, обладая более высокой скоростью передачи данных.

Основными составными частями любой спутниковой навигационной системы являются:

– Космический сегмент – состоящий непосредственно из навигационных спутников и систем технической поддержки. Плоскости орбит этих спутников

перпендикулярны экватору и равномерно разнесены по долготе. Каждый спутник снабжен микропроцессором для обработки данных, приемником и передатчиком для связи с наземной системой управления и для передачи функциональных сигналов пользователям, несколькими атомными часами для определения точного времени. Энергоснабжение спутника осуществляется солнечными батареями.

– Сегмент управления – предназначен для высокоточных наблюдений ИСЗ. Система управления объединяет операторов и наблюдателей станций слежения, рассредоточенных по всей планете. Они определяют орбиты спутников, постоянно контролируют функционирование их систем и точность хода часов и передают информацию на спутники для ретрансляции ее пользователям, имеющим специальный приемник, преобразующий сообщения со спутников в информацию о координатах.

– Сегмент пользователей – включает в себя наземных потребителей, обладающих спутниковой принимающей аппаратурой. Радиосигналы, принятые от спутников, служат для определения расстояний между спутником и приемником. Приемное устройство состоит из антенны, источника энергии, процессора с несколькими каналами ввода для приема различных сигналов со спутника, записывающего устройства для хранения обработанных данных и приборов, дающих возможность считывания информации пользователем.

Структурная схема СНС GPS и GLONASS представлена на рис. 14.

Табл. 13 суммирует особенности GPS и GLONASS, структуры их сигналов и точностные данные. GPS и GLONASS – автономные системы, каждая из которых имеет собственный временной стандарт. Стандарт GPS – универсальное кодированное время (UTC), американский эталон которого находится в Военно-морской Лаборатории США. Масштаб времени, принятый GLONASS - UTC (SU), национальный эталон Советского Союза.

Разногласие между этими эталонами составляет в настоящее время 2 с, но стабильность этой разницы не гарантируется.

Две системы выражают положения их спутников и, следовательно, их пользователей в различных геоцентрических системах координат. GPS основан на системе координат WGS84; GLONASS – на SGS85. Объединение систем координат требует оценки преобразования между ними. Экспериментальные результаты показывают, что координаты точек на земле, выраженные в различных системах координат, отличаются не больше, чем на 20 м. В случае объединенного использования систем GPS + GLONASS все пользователи видели бы по крайней мере восемь спутников одновременно (напомним, что для оценки местоположения требуются минимум четыре спутника), а 99 % пользователей видят 10 и большее количество спутников, и почти половина видят 14 и больше. Увеличится также точность определения местоположения пункта на поверхности Земли (табл. 14) при совместном использовании систем GPS + GLONASS.

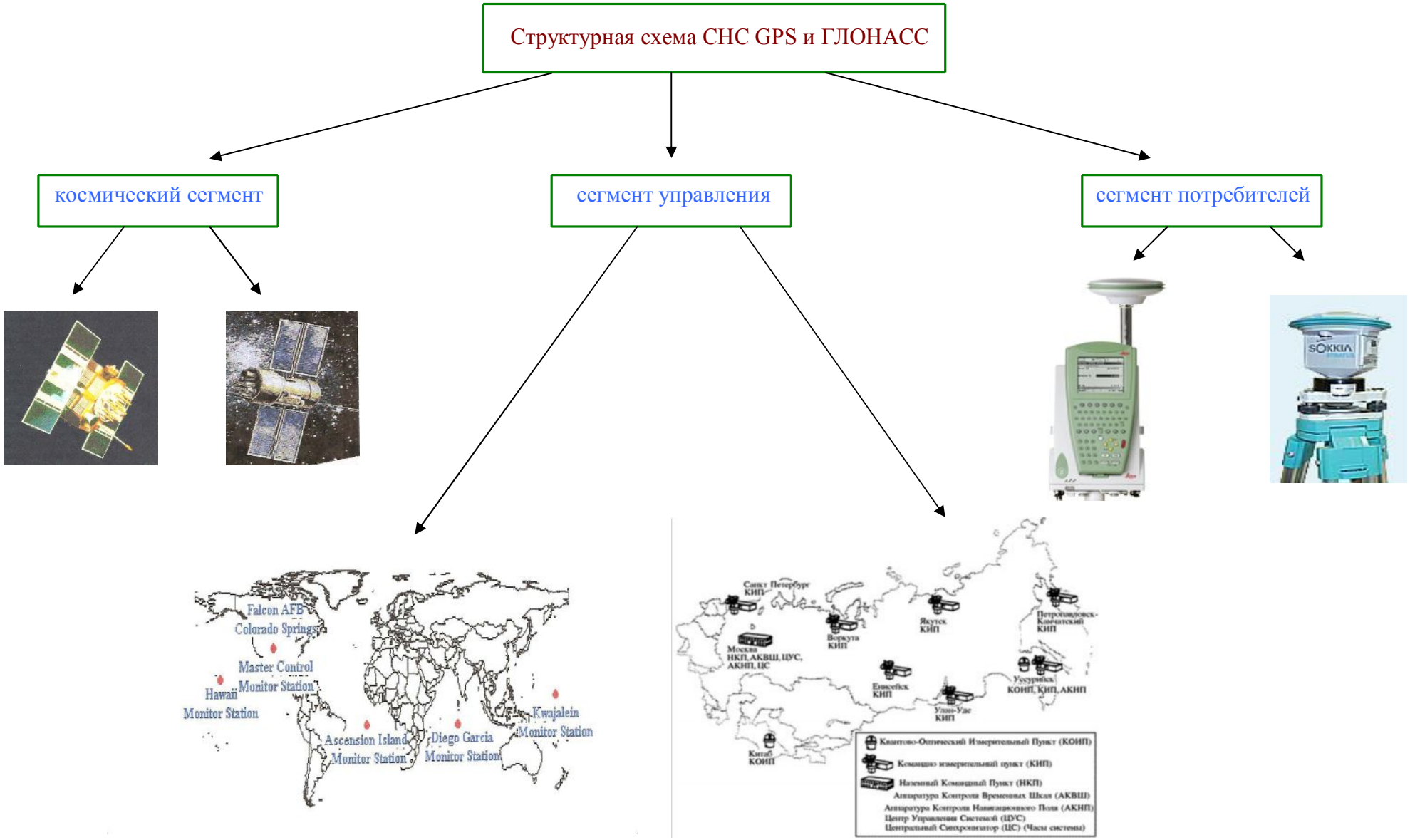


Рис.14. Структурная схема спутниковых навигационных систем

Таблица 13

Сравнительная характеристика GPS и GLONASS

	GPS	ГЛОНАСС
Число спутников	24	24
Число орбитальных плоскостей	6 по 4 ИСЗ	3 по 8 ИСЗ
Орбитальный наклон, град.	55	65,8
Орбитальный радиус (км)	26,560	25,510
Период (ч, мин)	11:58	11:16
Сигналы, МГц	L1: 1575.42 L2: 1227.60	L1: (1602 + 0. 5625n), L2: (1246 + 0. 4375n), n = 1,2, ..., 24
Частота кодирования, МГц	C/A 1.023; P 10.23	C/A 0.511; P 5.11
Система координат	WGS84	SGS85
Время	UTC (USNO)	UTC (SU)
Спецификация точности (95 %)		
Средняя квадратическая погрешность определения координат в абсолютном режиме, м	10-15	15-20
Период вращения спутников (ч)	12	11-15
Космодромы, с которых выполняется запуск спутников	Мыс Канаверал, Западный ракетно-космический полигон.	Байконур, Капустин Яр, Плесецк, Свободный

Таблица 14

Точность определения местоположения GPS, ГЛОНАСС и при их совместном использовании

	Горизонтальная ошибка		Ошибка по высоте
	50 %	95 %	95 %
GPS (без SA)	7	18	34
GPS (с SA)	27	72	135
ГЛОНАСС	10	26	45
GPS+ГЛОНАСС	9	20	38

Спутники GPS передают два сигнала: L1 с частотой 1575.42 MHz, который несет навигационное сообщение и SPS код и L2 с частотой 1227.60 MHz, используемый для измерения ионосферной задержки в приемниках PPS. Три различных двоичных кода сдвигают фазы сигналов L1 и L2:

– код C/A (Coarse Acquisition (грубое обнаружение)) модулирует фазу сигнала L1. Этот код – повторяющийся с частотой 1 MHz псевдо-случайный шум (Pseudo-Random Noise (PRN)). C/A код повторяется каждые 1023 бита (од-

на миллисекунда) и уникален для каждого спутника. Спутники GPS часто идентифицируются их PRN числом (номером). Этот код является основой гражданского SPS.

– P-код (Precise-code) модулирует как сигнал L1 так и сигнал L2. Он представляет из себя очень длинный (семь дней) 10 MHz PRN. Псевдокод шифрован в Y-код. Для расшифровки Y-кода требуется секретный AS(anti-spoofing) – модуль для каждого канала приемника. Этими модулями располагают только пользователи с криптографическими ключами. P-код – основа для PPS.

Навигационное сообщение модулируется по C/A коду. Это сообщение – 50 Hz сигнал, состоящий из информационных разрядов, которые описывают орбиты спутников GPS, синхронизируют коррекцию и другие параметры системы.

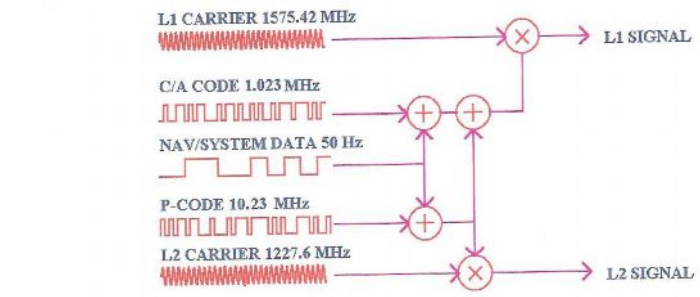


Рис. 15. Сигнал GPS

Спутники GPS выводятся точно на свои орбиты и поскольку на высоте 20 000 км торможение атмосферное отсутствует, остаются на них в течение длительного времени. Ресурс спутника на орбите 7,5 лет. Каждый приемник содержит в памяти компьютера «альманах» – справочник, из которого видно, где будет находится каждый спутник в любой момент времени. Каждый спутник в непрерывном режиме передает не только свои индивидуальные дальномерные коды, но и сообщения о своем положении на орбите, о движении остальных спутников, о состоянии своих бортовых систем.

Каждый полный набор данных включает ионосферную модель, которая используется в приемнике для аппроксимации задержки фазы сигнала при его прохождении через ионосферу при любом расположении спутников и в любой момент времени.

Каждый SV посылает значение разницы между GPS временем и Универсальным Координированным Временем (UTC). Это значение может использоваться приемником, чтобы установить UTC с точностью в пределах 100 ns.

К сегменту потребителей систем GPS и ГЛОНАСС относятся приёмники сигналов спутников. По измерениям параметров этих сигналов решается навигационная задача. Приёмник можно разделить на три функциональные части (рис. 16):

– радиочастотную часть усиливает входной сигнал, преобразует частоты;

– цифровой-коррелятор. Задача коррелятора формировать опорный сигнал, согласно с управляющими воздействиями (кодами управления), поступающими с процессора;

– процессор.

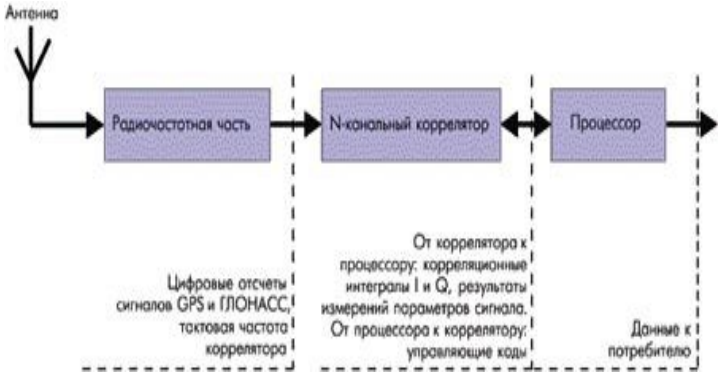


Рис. 16. Обобщённая структура приёмника

Дальность при радиотехнических измерениях характеризуется временем распространения сигнала от объекта измерения до измерительного пункта. В навигационных системах GPS/ГЛОНАСС излучение сигналов синхронизировано со шкалой времени системы, точнее, со шкалой времени спутника, излучающего данный сигнал. В то же время, потребитель имеет информацию о расхождении шкалы времени спутника и системы

Источники ошибок GPS-измерений. Геометрическая сущность задачи позицирования при использовании СНС заключается в решении обратной линейной геодезической засечки, причем роль пунктов с известными координатами играют спутники. Известно, что один из основных факторов, влияющих на точность засечки, есть погрешность геометрической связи, которая определяется величиной углов при засечке и ее формой.

Эффект влияния расположения «созвездия» спутников на точность позицирования называется геометрическим фактором точности (DOP – Dilution of Precision).

В зависимости от типа координат или их комбинаций, которые оценивают, различают следующие основные варианты DOP:

$VDOP \cdot \sigma_0$ – погрешность по высоте;

$HDOP \cdot \sigma_0$ – погрешность при двумерном позицировании на плоскости;

$PDOP \cdot \sigma_0$ – погрешность при трехмерном позицировании;

$TDOP \cdot \sigma_0$ –погрешность по времени;

$HTDOP \cdot \sigma_0$ – погрешность в двумерном позицировании и по времени;

$GDOP \cdot \sigma_0$ – точность в трехмерном режиме и времени (геометрический DOP).

σ_0 – погрешность в данной координате при позицировании.

Наглядно «хороший» и «плохой! Геометрический фактор можно представить следующими схемами (рис. 17).



а) б)

Рис. 17. Геометрический фактор:

а) – плохой GDOP; б) – хороший GDOP

На точность определения координат существенное влияние оказывают ошибки, возникающие при выполнении процедуры измерений. Природа этих ошибок различна. Ошибками определения местоположения пункта являются:

Неточное определение времени, возникающее из-за погрешности шкалы времени аппаратуры спутника. Ошибки спутниковых часов, неисправленные сегментом управления могут приводить к ошибкам порядка 0,6 м.

Ошибка вычисления орбит или ошибки в эфемеридных данных. Эта ошибка носит систематический характер и приводит к ошибке измерения координат $\approx$0,6 м.

Инструментальная ошибка приемника обусловлена наличием шумов в электронном тракте приемника. Наличие данной погрешности приводит к возникновению координатной ошибки порядка 1,2 м.

Многопутность распространения сигнала появляется в результате отражения сигнала спутника от крупных препятствий, расположенных в непосредственной близости от приемника. Влияние данного фактора может увеличить-ошибку определения псевдодальности на 2, 0 м.

Ионосферные задержки сигнала. Для компенсации возникающей при этом ошибки определения псевдодальности используется метод двухчастотных измерений. При этом величина остаточной немоделируемой ионосферной задержки может вызывать погрешность определения псевдодальности около10 м.

Тропосферные задержки. Величина задержки зависит от метеопараметров, а также от высоты спутника над горизонтом. Тропосферные задержки вызывают ошибки измерения псевдодальностей в 1 м.

4. 3. Планирование и выполнение GPS – измерений

Наиболее эффективным средством исключения ошибок при измерении псевдодальностей является дифференциальный способ наблюдения. Его суть состоит в выполнении измерений двумя приемниками: один устанавливается в в точке с известными координатами (базовая – референц станция) , а второй

собирает данные в точках с неизвестными координатами (ровер – передвижной приемник).

Для геодезических GPS- измерений необходимо наблюдение одних и тех же 4 спутников двумя GPS- приемниками. Результатом объединения данных, полученных двумя приемниками – базовым и ровером, является пространственный вектор между ними. Этот вектор называется базовой линией (базой). Для измерения в реальном времени используется радиомодем. Методы измерений с постобработкой требуют записи данных в поле и последующей их совместной обработки на компьютере.

Для изучения движений тектонических платформ, определения СДЗП используется метод статики. Данный метод обеспечивает высокую точность на длинных расстояниях, но сравнительно медленные измерения.

Статика – первый метод, разработанный для GPS измерений. Он может быть использован для измерений длинных линий (обычно 20 км и более), а поэтому наиболее целесообразен при изучении современных движений земной поверхности.

Один приёмник устанавливают на точке, координаты которой точно известны в системе WGS84. Он называется референц – станцией. Другой приёмник (ровер) устанавливается на другом конце базовой линии. Данные записываются обоими приёмниками одновременно. Важно выполнять запись данных каждым приёмником с одной и той же частотой (интервалом в записи данных). Обычно это 15, 30 или 60 с.

Приёмники выполняют запись данных в течение некоторого отрезка времени. Этот период зависит от длины линии, числа наблюдаемых спутников и спутниковой геометрии, которую характеризует такой показатель как «снижение точности» или DOP. За правило считается, что статика должна выполняться в течение минимум 1–72 ч на линиях 20 км с пятью спутниками и преобладающим значением GDOP 8. Длинные линии требуют более длительного периода наблюдений.

После достаточного накопления данных приёмники можно выключить. Затем ровер может перемещаться на следующую определяемую точку для измерения следующей базовой линии.

Очень важно выполнить избыточные измерения в сети. Например, выполнить измерения на точках, по крайней мере, дважды или выполнить измерения дополнительных векторов, чтобы избежать проблем, которые иначе не были бы обнаружены.

Для успешного выполнения высокоточных GPS- измерений необходимо планировать их выполнение. Топографические карты масштаба 1:25 000 до 1: 100 000 являются наиболее подходящими для этой цели. Все пункты сети наносятся на карту вместе с известными (контрольными) пунктами. Не стоит использовать контрольные пункты, не включенные в государственную геодезическую сеть. При планировании GPS- измерений пункты необходимо размещать в районе хорошей видимости неба, начиная с высоты 20^0 над горизонтом.

Полная привязка GPS-сети к национальной системе координат требует выполнения наблюдений минимум на 3 пунктах с известными координатами.

Вторым шагом в планировании наблюдений является определение оптимального для наблюдений в рамках данного дня интервала и решение вопроса, как поделить этот интервал на сессии. Сессии – это периоды, выбранные для наблюдений, когда два или более приемников одновременно отслеживают те же самые спутники.

Оптимальным является интервал (окно), когда одновременно можно наблюдать максимальное число спутников. Оптимальное окно находят просматривая схемы азимут-высоты спутников, либо соответствующие таблицы. Программы для построения таких схем предоставляются производителями приемников. Более наглядное представление о видимости спутников дает диаграмма «азимут – высота», или рисунок небесной сферы. Выполнение условия видимости спутников недостаточно. Они должны быть хорошо распределены по небу с точки зрения геометрии. Мерой геометрии спутников является GDOP. Его значение меньшее 6 считается хорошим. Выбор оптимальной конфигурации сети спутников выполняется программой приемника автоматически. Наблюдения в ночные часы являются наиболее подходящими, т. к. они в большей мере свободны от ионосферной рефракции. Дневные часы предпочтительнее по чисто организационным причинам.

Подходящим моментом для начала первой сессии является тот, когда имеется четыре или более спутников выше высоты от 15 до 20^0. Последним моментом сессии должен быть тот, когда четвертый спутник покидает ниже высот от 15 до 20^0.

Факторы, определяющие длину сессии таковы:

– относительная геометрия расположения спутников и ее изменения;

– число спутников;

– степень возмущения ионосферы (для одночастотных приемников);

– длина базы;

– количество препятствий на местности.

Чтобы привязать одиночную сессию к общей системе координат, нужно в течение всего проекта постоянно наблюдать на одном пункте, или же последовательные сессии должны содержать один повторный пункт, где процесс наблюдений повторяют. Наблюдения на повторных пунктах улучшает точность и надежность сети.

Минимальное число n сессий в сети из s пунктов при использовании r приемников определяется выражением

$$n = \frac{s - o}{r - o}, \tag{54}$$

где o – число перекрывающихся между сессиями пунктов.

Если каждый пункт сети будет посещаться m раз, минимальное число сессий равно

$$n = \frac{m \times s}{r}. \tag{55}$$

Число избыточно посещаемых пунктов i при минимальном перекрытии $o=1$ определяется выражением

$$i = n \times r - \left[s + (n-1)\right]. \qquad (56)$$

Для примера рассмотрим квадратную сеть, состоящую из девяти равномерно расположенных пунктов (П1, П2…П9). Измерения в сети выполняются тремя приемниками (А, Б, С). Наблюдения ведутся с одним перекрывающимся между сессиями пунктом. Уравнение (55) дает n =4. Первые четыре сессии в таблице 15 представляют собой один из вариантов соответствующего организационного плана, где на пунктах П4, П5, П6 наблюдения выполняются повторно. Если каждый пункт посещается дважды n = 6, что отражается еще двумя дополнительными сессиями в таблице

Таблица 15

Основы организационного плана

Сессия / Приемник	а	б	в	г	д	е
А	П2	П4	П4	П6	П7	П1
Б	П5	П5	П1	П3	П8	П2
В	П8	П6	П7	П9	П9	П3

Организационный план зависит также от типа сети. Имеется два основных типа GPS сети: радиальный тип и тип замкнутой геометрической фигуры.

В радиальной сети один приемник размещается в фиксированном пункте и от него измеряются вектора баз до других пунктов. Нет никаких геометрических ограничений для планирования такого типа сети, за исключением того, что пункты расположенные очень близко должны быть связаны прямыми наблюдениями. Но положение каждого пункта, определенного радиальным методом, нельзя проверить, так как имеется лишь одно определение координат. Поэтому данный метод не подходит для высокоточных измерений.

При статическом методе наблюдений, где важна точность, сеть должна образовывать замкнутую геометрическую фигуру. Предпочтительная схема наблюдений состоит в последовательном посещении смежных пунктов и переходе по фигурам.

Когда для пункта в схеме желательно получение координат и высот в национальной системе координат, должны быть сделаны привязки к существующей государственной сети. После размещения приемника на плановом контрольном пункте выполняются измерения между ним и ближайшим пунктом GPS - сети.

После нанесения GPS- пунктов на карту проводится рекогносцировка, в ходе которой на каждом пункте рассматривается возможность беспрепятственного обзора неба на высоте от 15 до 20^0 и отсутствие поблизости отражающих поверхностей. Каждому пункту назначается уникальный идентификатор.

Для успешного применения комплексов спутниковой геодезии при изучении процесса деформирования большое значение имеет организация и планирование полевых работ. Рассмотрим процедуру наблюдений на пунктах в зависимости от числа имеющихся приемников, пунктов наблюдений, типа сети, необходимости привязки вновь создаваемой сети к существующей. В результате планирования разрабатывается организационный план. Каждой бригаде назначаются пункты, на которых она должна провести наблюдения во время заданных сессий. Полевые бригады должны быть полностью ознакомлены с местностью и должны быть способны быстро передвигаться между пунктами. Построение опорных сетей методом статики показано на рис. 18.

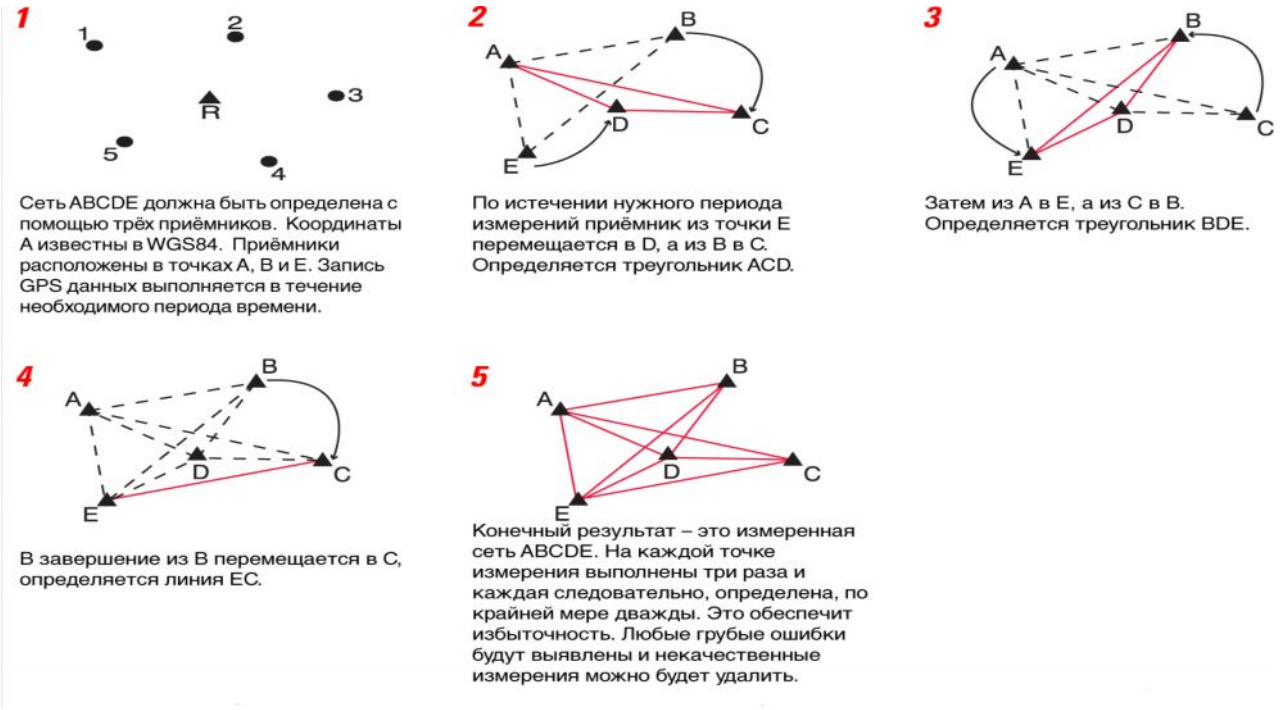


Рис. 18 . Построение опорных сетей методом статики

При разовых переопределениях координат деформационных сетей и при производстве измерений в мониторинговом режиме одной из проблем является выбор из всех пунктов сети тех, положение которых остается стабильным достаточно продолжительное время. Наличие таких пунктов в сети необходимо, когда ставится задача определить пространственные вектора смещений в этом случае производится строгое уравнивание сети с наложением определенных условий – фиксацией плановых координат и высот опорных пунктов сети. Однако, как показывает практика, это не всегда возможно сделать, поскольку ГГС подвержены деформированию, и поэтому, с одной стороны, использовать исходные данные следует крайне осторожно, а с другой стороны, фиксация координат части пунктов сможет значительно исказить уравниваемую сеть, что приведет к получению некорректного результата. Для того чтобы этого избежать, переопределяются не координаты пунктов сети, а фиксируются изменения пространственных геометрических связей между пунктами сети, которые

можно измерить непосредственно. В дальнейшем, при анализе величин деформаций, из всех пунктов сети выделяются пункты, которые от цикла к циклу не изменяют своего взаимного положения, и которые могут быть использованы в качестве опорных, в результате чего постепенно, от серии к серии мониторинговых наблюдений, картина динамики смещений и деформаций будет уточняться.

При создании сети особое внимание уделяется конструкции пунктов наблюдательной станции. Поскольку одним из самых главных требований производства высокоточных геодезических работ с применением GPS-оборудования является хорошая радиовидимость на всех определяемых пунктах, которая обеспечивается следующими факторами: низким значением коэффициента PDOP, высоким соотношением "сигнал/шум", качеством радиосигнала и отсутствием потери целых циклов при приеме радиосигнала, необходимо учитывать эти факторы заранее. В результате планирования определяются промежутки времени благоприятные и неблагоприятные для производства наблюдений. Как показывает практика, благоприятными для производства измерений являются промежутки времени, когда обеспечивается прием спутникового радиосигнала от 7–8 и более спутников при коэффициенте PDOP меньшем 4. При таких условиях наблюдений, можно проводить измерения на миллиметровом уровне точности.

При условии одновременной работы 2 и более GPS-приемников по результатам разности фаз спутникового радиосигнала возможно определение с миллиметровой точностью компонент вектора между двумя и более реперами наблюдательной станции. Жесткое требование условия одновременной работы 2 и более приемников спутникового радиосигнала в технологиях дифференциальной GPS обусловлено необходимостью исключения из результатов обработки погрешностей, вызванных влиянием ионосферы и тропосферы Земли. Под вектором в данном случае подразумевается результат обработки GPS-данных, представляющий собой линию с известными геоцентрическими компонентами X, Y, Z между двумя точками, находящимися на земной поверхности, относительно центра Земли в математическом эллипсоиде WGS-84. При одновременной работе большого количества GPS-приемников, при проведении полевых измерений образуется достаточное количество замкнутых геометрических построений, анализ которых позволяет оценить качество проведенных геодезических измерений.

Камеральная обработка результатов измерений логически разбивается на два этапа – постобработка и уравнивание геодезической сети. На этапе постобработки вычисляются вектора - базовые линии между наблюдательными пунктами сети. Вычисление векторов производится с использованием прецизионных спутниковых эфемерид, что позволяет в ряде случаев значительно повысить точность и надежность определения геометрических параметров сети. Наличие избыточных измерений позволяет получить несколько вариантов обработки одного и того же вектора сети, благодаря чему повышается качество обработки. Контролем качества камеральных работ на данном этапе являются ряд внут-

ренних контрольных параметров вычисления векторов, дублирующиеся определения векторов и контроль невязок замкнутых геометрических построений. Совокупность нескольких вычисленных векторов представляет собой пространственную GPS-сеть на поверхности математического эллипсоида. В зависимости от поставленных задач эта сеть может быть уравнена различными способами и в различных системах координат. В случае, если наблюдательная станция состоит из вновь заложенных пунктов, первоначальные координаты которых неизвестны, производится свободное уравнивание сети, в условной системе координат, в результате чего определяются уравненные значения длин линий и превышений между пунктами сети, изменение которых во времени определяет деформирование исследуемой территории. В случае использования в качестве части пунктов наблюдательной станции пунктов ГГС и опорных сетей задача усложняется, однако, корректное ее решение достигается с использованием пакета авторских методик.

В качестве примера рассмотрим технологию GPS – наблюдений на Шелекском геодинамическом полигоне, для определения базовых линий в плановой геодезической сети 1 класса. Она заключалась в следующем:

– перед началом полевых работ GPS-приемники прошли технический осмотр и компьютерное тестирование;

– наблюдения пунктов триангуляции проводились согласно графику;

– измерения на пунктах выполнялись синхронно группой, состоящей из шести спутниковых приемников: два приемника GPS 500 и четыре приемника GPS 1200;

– продолжительность сеансов наблюдений на каждом пункте составляла 72 ч, с регистрацией сигналов от спутников через 30 с;

– после завершения каждого сеанса, бригады двигались таким образом, чтобы расстояния в переездах между пунктами были кратчайшими;

– спутниковые измерения выполнялись по программе статических измерений-Static с использованием одной перманентной (базовой) станции;

– перманентная станция на Шелекском ГДП была установлена над центром пункта Агаш и работала в постоянном режиме на протяжении всего цикла измерений на ГДП;

– на каждом пункте антенна GPS - приемника устанавливалась строго над центром с помощью специального приспособления;

– после завершения сеанса наблюдений на каждом пункте вся информация фиксировалась на PC - карту, а по завершению всего цикла измерений вносилась в базу данных;

– обработка данных (вычисление координат, трансформация сети, уравнивание) производилась по программе SKI-PRO, версия 2.1 с учетом точности спутниковых измерений, в том числе количества принимаемых спутников, геометрии их расположения, длительности наблюдений, точности эфемерид.

Передача координат на перманентную станцию и трансформирование выполнялось с 12 пунктов триангуляции 1 класса с применением спутниковых навигационных измерений приборами системы GPS. Координаты получены в

системе WGS 84. Перевод координат из системы WGS 84 в систему координат СК-42 выполнен по программе SKI-PRO.

Разрешение неоднозначности для базовых линий длиной до 20 км обычно выполняют с помощью алгоритма пост-обработки быстрой статики, входящего в программное обеспечение SKI. С помощью программы SKI- PRO преобразовываются известные прямоугольные координаты точки в геодезические или прямоугольные координаты для используемого референц-эллипсоида.

Для измерений СДЗП в настоящее время в Республике Казахстан используется оборудование зарубежного производства. Это спутниковые геодезические приемники (одночастотные и двухчастотные) таких зарубежных фирм как Trimble Navigation (США), Sokkia (Япония), Leica (Швейцария).

Геодезические приемники делятся на:

– кодовые и бескодовые в зависимости от возможностей декодировать системы кодов;

– одно- и двухчастотные в зависимости от количества частот, на которых работает приемник;

– одно-и многоканальные в зависимости от количества ИСЗ, которыое приемник может пеленговать одновременно;

– одно- и многосистемные в зависимости от его возможности работать в различных навигационных системах.

5. ТЕХНОГЕННЫЕ ПОЛИГОНЫ

5.1. Назначение техногенных полигонов

Техногенное вмешательство человека в природу не только нарушает равновесие экологических систем, но и активно воздействует на геодинамические процессы.

Техногенные полигоны создаются в местах эксплуатации месторождения полезных ископаемых и интенсивного использования подземных вод [41]. Целью устройства техногенных полигонов является изучение смещений геодезических знаков и деформации земной поверхности на территориях эксплуатируемых месторождений жидких, газообразных, твердых полезных ископаемых.

Влияние деятельности человека (откачка грунтовых вод, нефти и газа, шахтные выработки и т. д.) приводит обычно к необратимым смещениям земной поверхности.

Приведем некоторые данные. В районе Донбасса, Подмосковного и других угольных бассейнов в местах горных выработок наблюдалось опускание земной поверхности более чем на 2 м. Область опускания поверхности распространяется не только непосредственно на район горных выработок, но и выходит за пределы этого района. Наряду с опусканием земной поверхности, нередко имеет место поднятие.

Откачка грунтовых вод, главным образом в целях водоснабжения, также приводит к значительному оседанию земной поверхности. Так, например, в долине реки Джакин (Калифорния, США) откачка грунтовых вод за 22 года привела к осадке земной поверхности на 4, 4 м, а в городе Мехико в ряде районов за последние 30 лет отмечается до 6 м осадка. При этом оседание почвы происходит не только в местах откачки воды, нефти и газа, где оно наиболее значительно, но и далеко за пределами этих мест, где величина оседания постепенно убывает.

На техногенных полигонах проводятся исследования для установления влияние инженерно-технической деятельности человека, вызывающей техногенные движения, на эндогенные процессы, в частности, на сейсмический режим с целью предупреждения землетрясений.

Казахстан занимает одно из ведущих мест среди стран СНГ по добычи нефти и газа. Нефте - и газодобыча практически всегда потенциально опасны для загрязнения среды [41, 42]. Интенсивная разработка углеводородного сырья, как правило, сопровождается также мощным техногенным воздействием на окружающую среду. Возможность возникновения техногенных землетрясений, а также значительных смещений земной поверхности, способных привести к катастрофическим аварийным ситуациям, таким, как разрывы продуктопроводов, выход из строя эксплуатационных скважин, разрушение жилых и производственных землетрясений, коммуникаций достаточно велика. Современная история имеет факты проявления техногенной сейсмичности разрушительной силы. В частности, разрушительные землетрясения в Газли (Узбекистан) и

Нефтегорске (Сахалин), специалисты связывают с результатом эксплуатации месторождений. Вертикальные и горизонтальные смещения земной поверхности техногенного характера в зоне нефтяных разработок возникают практически на каждом месторождении.

Комплексное изучение, оценка и объективный прогноз и техногенной сейсмичности и смещений земной коры при разработке месторождений невозможны без организации мониторинга деформирования земной поверхности, т. е. без создания геодинамических полигонов.

В Институте сейсмологии МОН РК создан центр геодинамических исследований. Центром разработана Концепция геодинамической безопасности освоения месторождений углеводородов Республики Казахстан и Методическое руководство по созданию комплексных геодинамических полигонов и проведению многофункционального мониторинга природно-техногенных сейсмодеформационных процессов при освоении углеводородного потенциала недр Республики Казахстан [42].

Министерством энергетики и минеральных ресурсов РК определен список 30 месторождений углеводородов, на которых необходимо проведение геодинамического мониторинга.

В настоящее время осуществляется сейсмический и геодинамический мониторинг на нефтегазовых месторождениях Тенгиз, Карачаганак, Кумколь, Жанажол, Кенкияк, Кашаган [43].

Изучение и мониторинг состояния недр важны при разведке и эксплуатации месторождений, особенно нефтяных и газовых. При этом главной задачей является прогнозирование техногенных процессов и их последствий до свершения непредсказуемых техногенных явлений и катастроф.

К выбору полигонов предъявляются определенные требования:

1. Месторождение должно иметь небольшой срок эксплуатации и обладать мощными нефте-газо - и водоносными горизонтами.

2. Месторождение должно быть обособленно от смежных эксплуатируемых месторождений (расстояние 40–50 км).

3. Месторождение должно непрерывно эксплуатироваться.

4. Территория месторождения по возможности должна отвечать условиям удобства выполнения геодезических измерений.

5. В зонах месторождений нефти следует учитывать, что в результате эксплуатации мест, уплотнение пластов и оседания земной поверхности наиболее значительны при отборе нефти без закачки воды в нефтеносные горизонты.

6. При выработке твердых полезных ископаемых в задачу геодезических полигонов входит решение вопросов, связанных с оседанием земной поверхности вследствие откачки подземных вод.

Районы нефте- и газодобычи имеют свои особенности проявления СДЗП. Здесь могут возникать движения, обусловленные только тектонической жизнью Земли и техногенные СДЗП, возникающие от воздействия откачки нефти и газа и закачки воды. Техногенные СДЗП могут значительно превосходить естественные СДЗП по интенсивности проявления, что, в свою очередь, вызывает

негативные последствия. Для исключения, или ослабления негативного воздействия техногенных СДЗП необходимо управлять режимом добычи и закачки воды, осуществлять которые без знания естественного и техногенного режимов СДЗП невозможно.

Осуществление геодинамических наблюдений на техногенных полигонах позволяет выявить естественный режим СДЗП и его техногенную составляющую. Использование современных машинных методов расчета деформаций и напряжений позволяет прогнозировать и предупреждать негативные последствия от техногенного воздействия от эксплуатации месторождений.

5.2. Основные геодезические высотные и плановые построения на техногенных полигонах

Основными геодезическими построениями на техногенных ГДП являются сети высокоточного нивелирования. Развитие плановых сетей целесообразно лишь в случае значительных вертикальных смещений земной поверхности (5 см в год).

Расположение и густота геодезических пунктов на территории геодинамического полигона определяется рельефом поверхности месторождения и особенностями его тектонического строения. Конкретное расположение геодезических пунктов на территории ГДП определяется при рекогносцировке.

Для изучения региональных фоновых геодинамических процессов с целью оценки их влияния на возникновение природно-техногенных процессов в пределах разрабатываемого месторождения и в ближайших к нему зонах, строятся региональные линии повторного нивелирования, которые соединяются с линиями нивелирования, пересекающими территорию месторождения. Мониторинг зонального масштаба (зональные системы наблюдений) охватывает зоны разломов и расположенные вдоль этих зон природно-технические системы, объекты, населенные пункты и коммуникации. Локальный мониторинг предусматривает детальное изучение геодинамических процессов в пределах потенциально опасных выявленных участков на территории месторождения. Это скважины, нефтеперерабатывающие комплексы, магистральные коммуникации и другие объекты. Сочетание всех видов мониторинга позволит более надежно выработать прогностические признаки возникновения чрезвычайных геодинамических событий.

В течение первых лет производится закладка реперов и выполняется повторное нивелирование вдоль системы региональных и зональных линий, которые пересекают вкрест и по простиранию территорию месторождения. Количество региональных профилей зависит от размера месторождения. Для месторождения длиной до 10 км должно быть заложено два профиля вкрест простирания и один по простиранию месторождения. С увеличением длины месторождения на каждые 10 км, количество региональных профилей вкрест его простирания увеличивается на один профиль. По простиранию месторождения коли-

чество профилей не должно быть более двух. В случае изометрической формы региональные нивелирные линии располагаются по взаимоперпендикулярной системе из расчета два профиля на каждые 100 км^2. На региональных профилях выполняются ежегодные или дважды в год повторные наблюдения. На участках с выявленными аномальными проявлениями движений, производится сгущение зональных профилей и создаются локальные полигоны.

Пункты нивелирования размещаются вдоль региональных и зональных профилей в среднем на расстоянии 700–900 м друг от друга, на локальных - на расстоянии 400–500 м друг от друга. Вне зоны месторождения реперы закладываются через 2–5 км.

Концы профильных линий, пересекающих месторождение, должны выходить за его границы не менее чем на 5 км и закрепляться фундаментальными реперами. В нивелирную сеть полигона включаются обсадные трубы глубинных не работающих скважин, как в зоне месторождения, так и за его пределами. В качестве нивелирных линий используются стандартные пункты, конструкция и способ закладки которых определены [41].

В соответствии с целевым функциональным назначением нивелирных построений к центрам нивелирных пунктов предъявляются следующие требования:

– оперативность их отыскания и длительная сохранность;

– минимальная трудоемкость при закладке и возможность использования при этом средств механизации;

– обеспечение устойчивости, т. е. сохранение в установленных пределах планового и высотного положения независимо от времени года, природных условий и продолжительности эксплуатации.

Последнее требование является определяющим, и его выполнение в значительной степени зависит от конструкции центра, способа его закладки и инженерно-геологических условий района работ.

Конструкции центров устанавливаются нормативно-техническими документами. Для высотных сетей II класса требования по устойчивости реперов считаются обеспеченными, если их смещение не превышает 4 мм.

При выборе типа центра определяющим был уровень эндогенных, экзогенных и техногенных процессов, приводящих к возможному нарушению их устойчивости как в течение сезона, так и в условиях длительного времени.

Набухание грунта вследствие временного повышения его влажности, давления грунтовых вод, может привести к смещению геодезических центров. Из экзогенных процессов наиболее существенным является влияние морозного пучения, когда за счет увеличения объема водонасыщенных грунтов при их замерзании может быть значительное изменение положения центра.

Для обеспечения стабильности нивелирного центра при его закладке в зонах сезонного промерзания грунтов необходимо обеспечить выполнение следующего условия:

$$0.9\left(M+G+T\right)\geq F\,, \qquad (57)$$

где F – сила морозного пучения; T – сила трения талого грунта о боковую поверхность центра; M и G – общая масса центра и масса лежащего под его якорем грунта.

Заменяя в формуле (53) входящие в нее величины на их аналитические выражения можно получить длину трубчатого центра

$$0{,}9\pi\left[L\gamma_{cm}\left(R_1^2-R_2^1\right)+LR_2^2\gamma_{б}+2\left(L-i-h\right)R_1 f_T\right]\geq 2\pi hR_1 f_n\,, \qquad (58)$$

где L – длина трубчатого центра; i – высота центра над поверхностью земли; h – глубина промерзания грунта; γ_{cm} =7800 кН/$м^3$; $\gamma_{б}$ = 2400 кН/$м^3$; f_T – удельная сила трения; f_n – удельная сила пучения.

Для закрепления нивелирных линий может выполняться закладка грунтовых реперов специальной конструкции, описание которого приведено на рис.19.

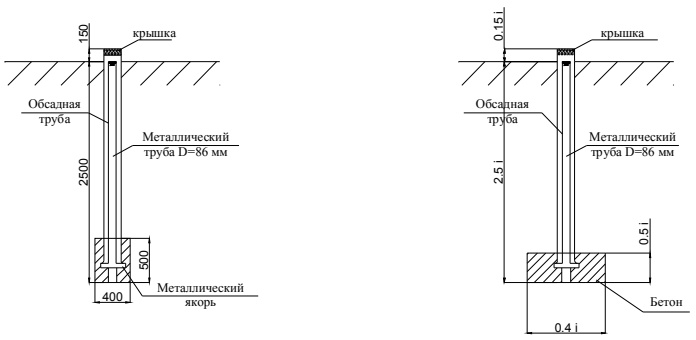


Рис.19. Буронабивной репер

Это буронабивной центр, закладываемый на глубину 2.5 м. Центр закладывается в скважину диаметром 400 мм, которая проходится шнековым буром. Несущим пилоном является металлическая труба диаметром 86 мм, закладываемая в бетонный якорь, ∅ 0,4 м и высотой 0,5 м. В верхнюю часть несущего пилона впрессовывается марка из цветного металла. Нивелирная марка располагается ниже уровня грунта. Для изоляции пилона от окружающего грунта, обеспечения быстрого доступа к центру и визуального обозначения на местности, несущий пилон помещен в обсадную трубу, выступающую выше поверхности земли на 15 см. Своей нижней частью обсадная труба опирается на якорь, а сверху обеспечена крышкой, изолирующей марку в период между повторными нивелировками. Реперы соответствующим образом маркируются, снабжаются специальными охранными табличками.

Для определения вертикальных движений земной поверхности на месторождении выполняется повторное нивелирование II класса повышенной точности. Данная методика предусматривает сочетание относительно быстрого про-

изводства наблюдений с достижением достаточно высокого уровня точности, что позволяет надежно выявлять локальные аномалии современных вертикальных движений земной поверхности с амплитудами 3–5 мм и выше. Практическая точность наблюдений методом нивелирования II класса повышенной точности составляет ±1 мм/км.

Цикличность проведения наблюдений на период изучения естественного режима СДЗП составляет 3–4 раза в год. В последующие периоды она будет зависеть от интенсивности эксплуатации месторождения и, вызванных ею техногенных СДЗП. Наиболее приемлемой считается такая цикличность наблюдений, при которой величины смещений контрольных пунктов превысят предельно допустимую погрешность наблюдений. В случае проявления интенсивных техногенных движений предусмотрена организация мониторинга с помощью специальных тахеометрических высокоинтеллектуальных установок. В таком случае, измерения будут проводиться с любой необходимой периодичностью, а результаты измерений будут поступать в реальном времени по телеметрическим каналам непосредственно в центр обработки данных и далее – в службы, обеспечивающие режим эксплуатации месторождения, для принятия решений.

Технология работ предусматривает выполнение нивелирования в прямом и обратном направлениях. *Max* длина визирного луча не должна превышать 60 м, разность плеч на станции – 2,0 м, накопление разностей плеч по секции – 2.0 м [24]. В качестве переходных точек используются башмаки, что позволяет уменьшить влияние такого источника погрешностей, как оседание переходных точек. При использовании костылей рекомендуется разбивку трассы осуществлять за 0,5 –1,0 ч до начала нивелирования.

При использовании современных цифровых нивелиров с комплектом инварных трехметровых реек с BAR- кодом можно применять следующую программу наблюдений на станции (табл.16).

Таблица 16

Последовательность наблюдений на станции

Станция	Прямой ход	Обратный ход
Нечетная	$З_К, П_К, П'_К, З'_К$	$П_К, З_К, З'_К, П'_К$
Четная	$П_К, З_К, З'_К, П'_К$	$З_К, П_К, П'_К, З'_К$
Примечание: $З_К, П_К$ – отсчеты по задней и передней рейкам; $З'_К, П'_К$ – отсчеты после изменения горизонта прибора.		

Данная программа применяется при наличии нивелирных реек с одной штрих-кодовой стороной. Наблюдения выполняются при двух горизонтах инструмента.

Применение цифровых нивелиров позволяет уменьшить время на измерение и вычисление превышения на станции на 20 – 30 %. Запись и обработка результатов измерений на станции проводится с помощью процессора, встроенного в цифровой нивелир и работающего по определенной программе. Автоматическое снятие и регистрация отсчетов по нивелирной рейке позволяет также исключить личные ошибки наблюдателя. Результаты повторного нивелирования обрабатываются в соответствии с требованиями инструкций, действующих на территории РК.

В результате выполнения работ должны быть представлены:

– рабочая схема размещения линий нивелирования и пунктов вдоль них;

– описание размещения нивелирных пунктов (кроки);

– ведомости измеренных превышений между нивелирными пунктами (по стандартной схеме);

– технический отчет с оценкой точности и качества работ.

Для обработки нивелирования возможно использование программы НИВЕЛИР 1.1, производства фирмы КРЕДО–ДИАЛОГ.

Точность получения скоростей СВДЗП на геодинамических полигонах регламентируется неравенством

$$v_0 = \frac{\Delta h}{t} \geq m_u \times 2p_\beta , \tag{59}$$

где v_0 – расчетная скорость проседания земной поверхности; Δh - изменение превышений между двумя геодезическими знаками, повторно наблюдаемыми через интервал времени t; m_u – погрешность определения скорости =3 – нормированный коэффициент при вероятности $\beta = 97$ %.

Тогда предельное значение погрешности измерения скоростей СВДЗП определяется выражением

$$m_{u_{пред.}} \leq 17 \times 10^{-2} v_0 . \tag{60}$$

Погрешность измерения скоростей m_u первоначально зависит от инструментальной чувствительности метода, которая для повторного геометрического нивелирования определяется выражением

$$m_u = M \frac{\sqrt{2L}}{t}, \tag{61}$$

где M – средняя квадратическая погрешность нивелирования на 1 км хода длиной L (км).

Геодезические наблюдения с целью определения координат (X, Y, Z) пунктов на геодинамическом полигоне проводятся повторными спутниковыми наблюдениями с применением системы GPS. Наивысшую точность позицирования будет обеспечивать дифференциальный режим наблюдений. В начальный период наблюдений спутниковыми системами должны быть определены координаты подавляющей части пунктов сети полигона. В последующие периоды, когда будет определен естественный фон СДЗП, спутниковые наблюдения могут локализоваться на участках наиболее интенсивных движений. Поскольку погрешность высотных определений спутниковыми системами ниже высокоточного геометрического нивелирования определение СВЗДП должно выполняться высокоточным нивелированием.

Повторные (режимные) GPS- наблюдения на совокупности пунктов, закрепленных на полигоне, выполняются для выявления горизонтальных компонент смещений и деформаций земной поверхности.

Спутниковые методы изучения деформационных процессов по сравнению с наземными, имеют следующие преимущества:

– позволяют получать из одного и того же комплекса измерений вертикальную и горизонтальную компоненты смещений;

– для GPS- системы практически нет ограничений в длинах измеряемых линий;

– производительность работ с GPS- системой по сравнению с наземными методами выше в 4 раза, а стоимость работ ниже примерно в 5 раз;

– численность персонала при проведении полевых измерений уменьшается в 4–6 раз;

– нет необходимости обеспечивать прямую видимость между смежными пунктами наблюдений, которые можно наиболее целесообразно располагать на местности;

– с GPS- системой можно работать при любой погоде.

Первоначально на территории месторождения закладывается рекогносцировочная сеть GPS пунктов. При этом часть пунктов закладывается за пределами месторождения (на расстоянии одного- полутора размеров месторождения). Такая сеть позволяет получить информацию о региональных и зональных особенностях деформационных процессов. На участках с аномальными изменениями горизонтальных движений производится сгущение пунктов наблюдений для более детального изучения пространственно-временных особенностей движений и деформаций.

Пункты GPS- сети должны быть совмещены с пунктами наблюдений других видов работ. Как правило, в качестве пунктов используются уже существующие пункты геодезических сетей – государственной геодезической сети и опорных маркшейдерско-геодезических сетей. GPS- наблюдения должны проводиться, по возможности, одновременно с другими видами наблюдений. Должна быть обеспечена долговременная сохранность пунктов GPS- сети. Система наблюдений должна состоять из совокупности опорных и рядовых пунктов, отвечающих определенным задачам мониторинга деформаций. Пункты опорной сети составляют примерно 10 % от общего количества пунктов и размещаются за пределами месторождения. Это позволяет контролировать региональную геодинамическую обстановку. Наблюдения на опорных пунктах обеспечивают соответствующую точность наблюдений на рядовых пунктах. Опорные пункты также используются в качестве исходных для построения векторов движений и деформаций. Основное назначение рядовых пунктов – контроль за деформационными процессами на отдельных локальных участках. Они закладываются как за пределами, так и в пределах месторождений. Закрепление GPS-пунктов производится стандартными нивелирными, триангуляционными или специально изготовленными пунктами.

Наблюдения на опорных пунктах ведутся в течение всего периода времени, которое необходимо для выполнения измерений на рядовых пунктах в одном цикле. Наблюдения на рядовых пунктах проводятся сеансами по 4–8 ч в течение 4–6 дней. Экономически целесообразно иметь 5–6 приемников для выполнения каждого цикла наблюдений на всей сети рядовых пунктов. В первые годы наблюдения целесообразно выполнять дважды в год. Результаты наблю-

дений обрабатываются по специализированным программам, использование которых позволит получить результаты с наивысшей точностью. По результатам повторных GPS- наблюдений могут быть получены:

– схемы современных горизонтальных движений массивов пород на территории исследуемого месторождения;

– компоненты главных деформаций и их изменения во времени;

– участки аномального деформирования пород;

– положение разломов с активным проявлением вдоль них горизонтальных движений и деформаций.

Для целей контроля за деформационными процессами требуется наивысшая точность определения параметров деформаций, поэтому для наблюдений должны быть использованы специализированные геодезические приемники спутниковых сигналов. Это приемники фирмы Trimble Navigation (США) серий Geodetic Surveyor 4000-SSE 4000-SSI. Они дают возможность непрерывной работы с 5 (минимум) спутниками в рекомендованное время и обеспечивают запись четырех лучших измерений из пяти, что обеспечивает измерения без илносферных искажений. Для горизонтальной компоненты точность базовой линии 5 мм ± 1 *ppm* и 10 мм ± 1 *ppm* для вертикальной компоненты.

Для проведения спутниковых геодезических измерений используется большой парк одно-и двухчастотной аппаратуры, состоящей из приемников геодезического класса фирм Sokkia, Leica.

5.3. Техногенные полигоны гидроэлектростанций

В особую группу техногенных полигонов можно выделить геодинамические полигоны гидроэлектростанций и атомных станций (ГЭС).

Геодинамические полигоны (ГЭС) служат для выполнения геодезических работ по изучению движений земной коры в районах строительства высоких плотин. В настоящее время установлен факт возникновения сильных землетрясений в районах крупных водохранилищ – «плотинные землетрясения» (Койна, Индия – 9 баллов, Сан-Фернандо, США – 9 баллов и т.д.). В этом случае создание крупных водохранилищ увеличивает нагрузку в верхних участках земной коры, что может спровоцировать «плотинное землетрясение» [44, 45, 46].

Геодинамические полигоны ГЭС создаются в районах строительства и эксплуатации крупных гидроэнергетических комплексов, расположенных в зонах повышенной сейсмичности. Основная их цель – изучение характера деформации ложа водохранилищ под действием нагрузки водных масс и поиск возможных предвестников «плотинных землетрясений».

Результаты измерений и их анализ показали, что на ряде объектов зафиксированы подъемы береговой линии при наполнении водохранилища (10–15 мм) до 2/3 объема. Граница поднятия до 5 км от берегов. На крупных гидроузлах вертикальные подвижки могут прослеживаться на удалении от во-

дохранилища до 10–15 км. Наполнение водохранилища изменяет расстояние между берегами и этот процесс носит сложный характер.

Комплекс геодезических работ для изучения вертикальных и горизонтальных движений земной поверхности в районах строительства высоких плотин, предложенный ЦНИИГАиК , должен включать:

1. Проложение замкнутого нивелирного полигона I класса по возможности по обоим берегам будущего водохранилища. Нивелирные знаки закладываются через 1–2 км, а в районах разломов и мест возможных оползней – чаще. При невозможности прокладки замкнутого хода по обоим берегам прокладывается ход по одному из берегов и изолированные ходы на участках второго берега, при этом производится высотная связь берегов водохранилища путем передачи высот через водные препятствия.

2. На каждом берегу прокладываются ходы нивелирования I класса в направлении, перпендикулярном к контуру водохранилища. Протяженность такого хода до 20–30 км. Трассы и места примыкания к основному полигону выбирают исходя из местных условий.

3. Берега водохранилища связываются в двух – трех местах геодезическими четырехугольниками с измерением светодальномерами всех пяти сторон. Все четырехугольники привязываются к пунктам, расположенным вне деформирующейся зоны (в 15–20 км от водохранилища).

4. В трех местах (примерно в 5, 10 и 15 км от створа плотины) образуются поперечники, на которых по особой программе измеряются три стороны между пунктами противоположных берегов, расположенных вблизи уреза, на высоте 100–105 и 200–400 м от уреза.

5. Определяется астрономический азимут на одном из пунктов сети.

Предполагаемая точность геодезического обеспечения при выполнении перечисленных требований в высотном отношении составит 2–4 мм, в плановом – 3–5 мм.

Такой комплекс работ рассчитан на идеальные условия. В зоне водохранилища можно ограничиться изучением деформаций в районах крупных разрывов геологических нарушений, где по характеру движений можно попытаться прогнозировать сейсмические события. На остальных участках можно либо совсем отказаться от измерений, либо выполнять их значительно реже.

5.4. Техногенные полигоны атомных станций

Геодинамические полигоны атомных станций (АС) – создаются для решения вопроса стабильности ЗП в районе размещения АС. При этом выявляются активные разломы и тектонические движения в районе строительства АС, выделяется сплошной блок земной поверхности под строительство АС.

Для решения вопроса стабильности земной поверхности в районе размещения АС важное значение приобретает этап геодезических работ по изучению

и исследованию геодинамических условий района. Цели геодинамических исследований:

– оценка геодезическими методами участка размещения АС в региональном тектоническом движении земной коры;

– выявление активности близлежащих разломов и стабильности отдельных геологических слоев земной поверхности в районе строительства АС;

– составление карт сейсмической активности и тектонических движений земной коры на район строительства;

– выделение сплошного блока земной коры под строительство;

– предоставление геодезических данных для принятия качественных проектных решений по размещению АС на данной территории.

Геодезическими методами выполняется оценка размещения АС в региональном тектоническом движении земной коры, выявляется активность близлежащих разломов в районе строительства АС, составляются карты сейсмической активности и тектонических движений земной коры на район строительства [47].

Для уточнения положения и степени активности тектонических нарушений, определения мелкой трещиноватости, а также для оценки общей устойчивости блока земной коры, на котором располагается площадка строительства АС, проводят высокоточные геодезические исследования СДЗП и ее приповерхностных слоев на глубинах заложения фундамента сооружений. Они служат для количественной оценки геодинамических условий района размещения АС и обоснования ее безопасности.

При определении вертикальной составляющей СДЗП геодинамические исследования выполняются методом высокоточного нивелирования короткими (до 25 м) лучами, горизонтальной составляющей – высокоточными дальномерными и угловыми измерениями. Длины линий и направлений на полигонах АС не должны превышать 5 км.

6. СЕЙСМИЧЕСКОЕ МИКРОРАЙОНИРОВАНИЕ

Сейсмическое микрорайонирование выполняется с целью количественной оценки влияния местных условий (состав грунтов, особенности рельефа, наличие сейсмических разломов и др.) на сейсмичность. Сейсмическая опасность с каждым годом не уменьшается, а растет в прямой связи с хозяйственным освоением сейсмоактивных территорий и воздействием человека на литосферную оболочку Земли (строительство крупных гидротехнических сооруже-

ний, добыча полезных ископаемых и т.п.). Повышенный литосферный риск связан и с размещением в сейсмоактивных регионах атомных электростанций и других экологически опасных объектов, поскольку даже незначительные землетрясения могут нарушить их нормальное функционирование.

Сейсмическое районирование одна из наиболее сложных и чрезвычайно ответственных проблем современной сейсмологии. Выделение сейсмоопасных районов основывается на результатах совместного анализа инструментальных и макросейсмических данных о землетрясениях прошлых лет и геологических особенностях района.

В настоящее время в Республике Казахстан, как и во всем мире, наблюдается стремление к строительству зданий повышенной этажности, в том числе и в сейсмически активных районах. В связи с этим, необходимо проведение работ по сейсмическому районированию городов с выделением очагов геодинамической опасности для зданий и сооружений. На основании исследований сейсмогенных зон, динамических свойств грунтов, конструкций зданий, разрабатываются мероприятия по оценке риска ущерба и потерь от геодинамических воздействий, по проектированию и строительству новых и защите существующих сооружений.

Уточнение величины сейсмических воздействий на сооружения в зависимости от местных условий конкретного участка территории сейсмоопасного района составляет предмет сейсмического микрорайонирования.

Графическим выражением сейсмического районирования являются карты, содержащие сведения об интенсивности сотрясений для любого географического пункта при средних грунтовых условиях. Для правильного проектирования и размещения объектов жилищного, промышленного и культурного строительства, для составления генплана развития города с учетом сейсмической опасности необходимо иметь крупномасштабную карту сейсмического микрорайонирования.

По геологическим и геодезическим материалам с учетом гидрологических особенностей территории составляется тектоническая основа сейсмической опасности города, составляется предварительная схема комплексного сейсмического районирования города и пригородов в масштабе 1:25 000.

На изучаемой территории проводятся специальные сейсмологические и геодезические наблюдения, направленные на получение дополнительных материалов для составления карты сейсмического микрорайонирования. Для этого выполняются профильные сейсмологические наблюдения, задачей которых является накопление записей землетрясений, пригодных для уточнения графика затухания интенсивности землетрясения с расстоянием.

Проведение комплексного микрорайонирования ограниченных площадей, разбитых разломами разных рангов на мелкие блоки, возможно лишь с использованием материалам по изучению современных вертикальных движений земной поверхности.

Главная задача такого типа работ – исследование подвижности тектонических блоков на территории города, направленности их движений с целью

выделить среди многочисленных разломов земной коры нарушения, преобладающие в тектонической жизни района, и разрывы второстепенные, как простые последствия прошлых движений. Вторая задача – установление местоположения разломов и ширины зоны их влияния.

Для решения поставленных задач создаются замкнутые нивелирные полигоны с диагональными ходами, пересекающими линии разломов на территории города. Нивелирные работы должны выполняться по усовершенствованной программе I класса. Плотность нивелирных знаков высокая до 200–800 м. Работы следует проводить с частотой опроса (число повторных нивелировок) до 6–8 раз в год на активных участках, выделенных на первом этапе наблюдений.

В процессе обработки материалов повторного нивелирования следует обращать внимание на изломанность графиков смещений современных вертикальных движений земной поверхности вдоль профилей, пересекающих тектонические структуры.

На основании гипотезы о соответствии зон опускания на графиках смещений зонам сжатия на местности, а зон поднятий – зонам растяжений, можно делать предварительные выводы о проявлении СВДЗП в современных активных разломах. Зоны разломов можно выделить по графикам скоростей СВДЗП. В зонах разломов происходит смена знаков скоростей СВДЗП.

Результаты высокоточных нивелирных исследований, таким образом, позволят уточнить положение разломов и их современную активность.

Для выявления активных разломов используется также метод равных амплитуд. Суть метода заключается в одновременном рассмотрении всего поля превышений реперов. Отметки каждого репера вычисляются относительно одного опорного репера, взятого условно за неподвижный. Для ослабления влияния систематических ошибок опорную точку желательно выбирать в центре сети.

По разностям отметок реперов, полученным независимо от нивелировок, проведенных в разное время, вычисляют величины вертикальных смещений реперов за период между двумя нивелировками. В дальнейшем величины вертикальных перемещений (амплитуд) реперов относительно опорного группируются в массивы, исходя из следующих соображений:

– реперы, расположенные на одном тектоническом блоке имеют примерно равные амплитуды вертикальных смещений;

– между двумя смежными реперами проходит активный разлом, если разности амплитуд перемещений превышают тройную ошибку нивелирования;

– величина разности амплитуд вертикальных перемещений между соседними блоками выступает как мера активности тектонического разлома. В этом случае считается, что изменение амплитуд вертикальных смещений между соседними блоками происходит на разделяющем их разломе.

Коротко остановимся на работах по сейсмическому районированию города Алматы. Территория города расположена в одной из наиболее сейсмоактивных зон Казахстана. В результате катастрофических землетрясений, происшедших здесь в конце XIX и начале XX столетия, город Верный (Алматы) был

дважды разрушен. В настоящее время население его составляет более 2 млн. человек, и город интенсивно застраивается. Поэтому проблема сейсмического микрорайонирования Алматы и прилегающих территорий весьма актуальна.

Работы по сейсмическому микрорайонированию города Алматы были начаты в 1953 г., а в 1962 г. составлена первая схема сейсмического микрорайонирования города. По геодезическим и геологическим материалам с учетом гидрологических особенностей территории была составлена тектоническая основа сейсмической опасности Алматы.

С 1979 г. на территории Алматинского промрайона проведены специальные сейсмологические и геодезические наблюдения. Для решения задач по выявлению мобильных разломов было выполнено сгущение сети реперов Алматинского геодинамического полигона до сотен метров на нивелирных линиях через Алматинский, Предгорный и Северо-Восточный разломы. В 1979 г. заложены Широтный и Северо-Западный нивелирные профили в юго-восточной части города. На основании выполненных наблюдений была составлена карта разломов Алматы в масштабе 1:25 000, которая сопоставлена с картой разломов тектоники, составленной по геолого-геофизическим материалам. Результаты нивелирных исследований в некоторой степени позволили уточнить положение разломов и их современную активность, а также установить следующее:

– в общем случае поле современных движений на север от Алмаатинского разлома носит спокойный характер, активизируясь при движении на юг;

– наибольшую сейсмическую опасность для Алматы представляют Заилийский и Предгорный разломы.

В целях регулирования деятельности по застройке и реконструкции объектов в сейсмоопасных районах Республики Казахстан, из числа ведущих специалистов в области сейсмостойкого строительства создана постоянно действующая Экспертная комиссия по рассмотрению вопросов по использованию территорий сейсмичностью 10 баллов и зон возможного проявления тектонических разломов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машимов М.М. Геодинамика: современные проблемы и перспективы // Геодезия и картография. Москва: Недра, 1995. С. 20-24.

2. Буланже Ю.Д., Певнев А.К. О состоянии и перспективах исследований современных движений земной коры на геодинамических полигонах СССР //

Современные движения земной коры (исследования на геодинамических полигонах). Новосибирск :Наука, 1978. С.4-7.

3. Мещеряков Ю.А. Вековые движения земной коры. Некоторые итоги и задачи исследований //Современные движения земной коры. М.: Академия наук СССР, 1963. С. 7-25.

4. Программа развития государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на 2004 – 2010 годы. Постановление Правительства Республики Казахстан от 31 декабря 2003 г. № 1383

5. Бланк Л.М. , Урманцев Ф.М. О геодезическом методе изучения современных горизониальных движений земной коры //Современные движения земной коры. Методы и результаты исследований. Киев: Наукова Думка, 1980. С.17-23.

6. Выскочил П. Состояние и результаты изучения современных движений земной коры на геодинамических полигонах в различных странах мира //Современные движения земной коры (теория, методы, прогноз). М.: Наука, 1980. С. 7-14.

7. Геодезические методы изучения деформаций земной поверхности на геодинамических полигонах (методическое руководство). М.: ЦНИИГиК, 1985.

8. Генике А.А., Наумов Я.В. Аппаратура для изучения современных движений земной коры //Современные движения земной коры. Методы и результаты исследований. Киев: Наукова Думка, 1980. С.23-28.

9. Корешков Н.А., Пискулин В.А., Райзман А.П. О состоянии и некоторых результатах геодезических работ на геодинамических полигонах Средней Азии //Современные движения земной коры (исследования на геодинамических полигонах). Новосибирск: Наука, 1978. С.59-67.

10. Ященко В.Р. Некоторые результаты изучения современных движений земной коры на геодинамических полигонах Тюменского региона //Современные движения земной коры (комплексные геодинамические полигоны). М.: Наука, 1987. С. 77-79.

11. Атрущкевич П.А., Остропико П.А. Геодинамические исследования на Алма-Атинском полигоне //Современные движения земной коры. М.: Наука, 1984. С.23-28.

12. Рекомендации по геодезическим работам на геодинамических полигонах. М.: ОНТИ ЦНИИГАиК, 1975.

13. Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР. М.: Недра, 1966.

14. Передеро В.С., Остропико П.А., Атрушкевич П.А. О методике инструментального изучения современных горизонтальных движений в Северном Тянь-Шане на локальных участках полигона //Современные движения земной коры (исследования на геодинамических полигонах). Новосибирск: Наука, 1978. С.67-74

15. Земцова А.В. Измерение горизонтальных углов и направлений: Метод. указ. Алматы: КазНТУ, 2005. 15 с.

16. Атрушкевич П.А., Калабаев Н.Б. Использование прецизионного светодальномера ДК-001 для изучения горизонтальных движений земной коры на Алмаатинском геодинамическом полигоне //Современные движения земной коры (комплексные геодинамические полигоны). М.: Наука, 1987. С. 36-38.

17. Земцова А.В. Ошибки дальномерных измерений, вызываемые действием фазовых задержек и рефракции //Тезисы докл. межд. науч.-практ. конф. к 45-летию РИИ «Горно-перерабатывающая промышленность и наука: реальность и перспективы сотрудничества». Рудный: 2005. С.8-12.

18. Земцова А.В., Байгурин Ж.Д. Точность определения показателя преломления воздуха в приземном слое атмосферы при светодальномерных измерениях //Геодезия. Картография. Геоинформационные системы. 2004 № 4. С. 40 – 45.

19. Земцова А.В. Ошибки линейных измерений при изучении геодинамических явлений на разрабатываемых месторождениях //Труды 2-ой Межд. науч.-практ. конф. посвященной 15-летию независимости Республики Казахстан. Алматы. 2006. С. 56-59.

20. Машимов М.М. Уравнивание геодезических сетей. М.: Недра, 1979. 367 с.

21. Земцова А.В. Определение горизонтальных деформаций в линейно-угловой сети: Метод. указ. Алматы: КазГАСА, 1998. 23 с.

22. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. М.: Недра 1990.

23. Нивелирование I и II классов (практическое руководство). М.: Недра, 1982.

24. Инструкция по вычислению нивелировок. М.: Недра, 1971.

25. Уставич Г.А., Шаульский В.Ф., Винокурова О.И. Разработка и совершенствование технологии государственного нивелирования I,II,III и IV классов //Геодезия и картография. 2003. № 7. С. 10-14.

26. Уставич Г.А., Шаульский В.Ф., Винокурова О.И. Разработка и совершенствование технологии государственного нивелирования I,II,III и IV классов //Геодезия и картография. 2003. № 8. С. 5-11.

27. Уставич Г.А. О совершенствовании технологий нивелирования //Геодезия и картография. 2005. № 3. С. 11-13.

28. Уставич Г.А. Технология выполнения высокоточного нивелирования цифровыми нивелирами //Геодезия и картография. 2006. № 2. С. 3-5.

29. Маслич Д.И., Патова .Ф. Методика ослабления систематических погрешностей в высокоточном нивелировании при определении скоростей современных движений земной коры // Современные движения земной коры. Киев: Наукова Думка, 1980. С.44-51.

30. Шалыгина Е.Л. Цифровое нивелирование – основные источники ошибок //Геодезия и картография. 2005. № 3. С. 15-18.

31. Земцова А.В. Геодезические работы на ГДП: Метод. указ. Алматы: КазГАСА. 1998. 12 с.

32. Указания по вычислению скоростей современных вертикальных движений земной поверхности по материалам повторного нивелирования. Москва: ОНТИ ЦНИИГАиК. 1974.

33. Руководящий технический материал по составлению карты современных вертикальных движений земной коры на территорию СССР по геодезическим данным. М.: ОНТИ ЦНИИГАиК. 1978.

34. Сигалов В.М. Карта относительных скоростей современных вертикальных движений земной коры Северного Тянь-Шаня //Современные движения земной коры (исследования на геодинамических полигонах). Новосибирск: Наука, 1978. С. 81-86.

35. Земцова А.В. Построение карты современных вертикальных движений земной коры: метод. указания . Алматы: КазГАСА, 2001. с. 14.

36. Корокина Т.П. Проблемы составления и обработки геодезической основы Карты современных вертикальных движений земной коры на территории Закавказья, Казахстана и Средней Азии //Современные движения земной коры (теория, методы, прогноз). М.: Наука, 1980. С. 62-65.

37. Остропико П.А., Антоненко Э М., Атрушкевич П.А. Опыт изучения современных движений земной коры в Приалматинском сейсмическом районе Современные движения земной коры (исследования на геодинамических полигонах) Новосибирск :Наука, 1978. С. 74-80.

38. Земцова А.В., Байгурин Ж.Д. Вопросы реконструкции Алматинской геодезической сети для целей землеустройства //Геодезия. Картография. Геоинформационные системы. 2004. №3. С. 25-29.

39. Татевян С.К., Кузин С.П., Ораевская С.П. Использование спутниковых позиционных систем для геодинамических исследований //Геодезия и картография. 2004. №3. С. 33-40.

40. Антонович К.М., Карпик А.П., Клепиков А.Н. Спутниковый мониторинг земной поверхности // Геодезия и картография. 2004. №4. С. 4 – 10.

41. Руководящий технический материал по проведению геодезических работ при изучении влияния техногенных процессов на деформацию земной поверхности. М.: ОНТИ ЦНИИГАиК, 1978.

42. Нусипов Е. Геодезическая безопасность освоения месторождений углеводородов Казахстана: Основные положения. //Наука и высшая школа Казахстана 2004. С. 1-3.

43. Передера В.С., Земцова А.В., Байгурин Ж.Д. Геодинамическая безопасность освоения месторождений углеводородов Казасхтана //Материалы межд. Конф. «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых ученых. М: 2005.

44. Наумов Я.В. Геодезические работы по изучению движений земной коры в районах строительства высоких плотин. //Современные движения земной коры (исследования на геодинамических полигонах). Новосибирск: Наука, 1978. С. 152- 154.

45. Карлсон А.А. О геодезических работах на геодинамических полигонах ГЭС //Геодезия и картография. 1991. № 10. С. 21-23.

46. Гуляев Ю.П., Павлов А.П. Геодезические исследования техногенной геодинамики на строящейся Богучанской ГЭС //Гидротехническое строительство. 1993. № 9. С. 8-11.

47. Лопанчук А.А. Изучение СДЗК при размещении атомных станций //Геодезия и картография. 1991. №10. С.19-23.

1. *Гуляев Ю.П., Павлов А.П.* Геодезические исследования техногенной геодинамики на строящейся Богучанской ГЭС //Гидротехническое строительство. 1993. № 9. С. 8-11.

2. Руководящий технический материал по проведению геодезических работ при изучении влияния техногенных процессов на деформацию земной поверхности. М.: ОНТИ ЦНИИГАиК, 1978.

3. *Татевян С.К., Кузин С.П., Ораевская С.П.* Использование спутниковых позиционных систем для геодинамических исследований //Геодезия и картография. 2004. №3. С. 33-40.

4. *Уставич Г.А.* Технология выполнения высокоточного нивелирования цифровыми нивелирами //Геодезия и картография. 2006. № 2. С. 3-5.

5. *Земцова А.В.* Геодезические работы на ГДП: Метод. указ. Алматы: КазГАСА. 1998. 12 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ		3
1.	ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ГЕОДЕЗИИ. КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ	5
2.	ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	11
3.	ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОЛИГОНЫ	15
3.1.	Цели и назначение прогностических геодинамических полигонов	15
3.2.	Основные геодезические построения на прогностических геодинамических полигонах	16
3.2.1.	Схемы плановых построений на геодинамических полигонах	16
3.2.1.1	Угловые и линейные измерения в геодезических сетях на геодинамических полигонах	20
3.2.1.2.	Математическая обработка повторных наблюдений в плановых построениях на геодинамических полигонах	30
3.2.2.	Основные высотные построения на прогностических ГДП	34
3.2.2.1.	Методика выполнения нивелирования на ГДП	34
3.2.2.2.	Обработка данных повторного нивелирования	47
3.2.3.	Краткая характеристика прогностических геодинамических полигонов в Республике Казахстан	56
4.	СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗУЧЕНИЯ ОПАСНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	62
4.1.	Определение СДЗП с использованием спутниковых навигационных систем	62
4.2.	Общая структура и состав спутниковых навигационных систем	64
4.3.	Планирование и выполнение GPS- измерений	71
5.	ТЕХНОГЕННЫЕ ПОЛИГОНЫ	79
5.1.	Назначение техногенных полигонов	79
5.2	Основные геодезические высотные и плановые построения на техногенных полигонах	81
5.3.	Техногенные полигоны гидроэлектростанций	87
5.4.	Техногенные полигоны атомных станций	89
6.	СЕЙСМИЧЕСКОЕ МИКРОРАЙОНИРОВАНИЕ	90
	Библиографический список	93

Учебное издание

Земцова Ангелина Валентиновна

ВЫСШАЯ ГЕОДЕЗИЯ
(Геодезические работы на геодинамических полигонах)

Учебное пособие

Зав. РО З.А. Габайдулина
Редактор Ш.К. Касымбекова
Техн. Редактор Ж.Н. Байменова
Компьютерный набор
и верстка

Подписано в печать ___ _____ 200 _ г.
Тираж 100 экз. Формат 60 × 84 1/16 Бумага типогр. № 1
Объем п.л. Заказ № _____ Цена договорная

Издание Казахского национального технического университета
им. К.И. Сатпаева
Научно-технический издательский центр КазНТУ,
Алматы, Ладынина, 32.

Вопросы к экзамену по дисциплине «Геодезические работы на прогностических полигонах»

1. Геодинамические задачи геодезии.
2. Понятие «современные движения» земной поверхности
3. Методы изучения СДЗП
4. Понятие геодинамический полигон, типы ГДП
5. Цели и назначение прогностических геодинамических полигонов
6. Схемы плановых построений на геодинамических полигонах
7. Угловые и линейные измерения в геодезических сетях на геодинамических полигонах
8. Математическая обработка повторных наблюдений в плановых построениях на геодинамических полигонах
9. Основные высотные построения на прогностических ГДП
10. Методика выполнения нивелирования на ГДП
11. Обработка данных повторного нивелирования
12. Краткая характеристика прогностических геодинамических полигонов в Республике Казахстан
13. Определение СДЗП с использованием спутниковых навигационных систем
14. Общая структура и состав спутниковых навигационных систем
15. Планирование и выполнение GPS- измерений
16. Сейсмическое микрорайонирование