

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет
имени К.И. Сатпаева

А. В. Земцова

**ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Рекомендовано Научно-методическим советом Университета
в качестве учебного пособия

Алматы 2014

УДК 528 (075.8)
ББК 26.11 я 73
3 55

3 55 *Земцова А.В.* Геодезические исследования геодинамических процессов: Учеб. пособие. – Алматы: КазНТУ, 2014. – 205 с.
ISBN 978-601-228-633-5

Учебное пособие содержит материал по основным вопросам применения методов геодезии к исследованию геодинамических явлений. Даны современные представления о фигуре Земли, ее внутреннем строении, физических полях, гипотезах тектоники плит и расширения океанического дна. Показана связь этих гипотез с современными движениями земной коры (СДЗК). Рассмотрены характерные особенности проведения геодезических работ на геодинамических прогнозных 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 магистрантов и докторантов PhD геодезических специальностей вузов, а также может быть полезно для специалистов по геодезии, маркшейдерии и геофизике.

УДК 528 (075.8)
ББК 26.11 я 73

Рецензенты:

Е.А. Исаханов, Каз АТК им. М. Тынышпаева, д-р техн. наук, проф.;
З.К. Куралбаев, АУЭС, д-р ф.-м. наук, профессор;
Ж.О. Отарбаев, КазНТУ, д-р техн. наук, проф.

Печатается по плану издания Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2014 г.

ISBN 978-601-228-633-5

© Земцова А.В. 2014 г.
© КазНТУ, 2014 г.

ВВЕДЕНИЕ

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

Геодезии принадлежит большая роль в решении этих геодинамических процессов. Впервые возникла возможность ставить эксперименты и выполнять высокоточные работы в планетарном масштабе, проводить обширные астрономо-геодезические, гравиметрические, спутниковые, радиоинтерферометрические, лазерные наблюдения, надежно определяющие фигуру и внешнее гравитационное поле Земли на каждую эпоху.

На современном этапе появилась практическая необходимость в создании планетарной земной системы отсчета, 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.

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

При проведении комплексных исследований с целью изучения тектонических движений, разработки методов поиска прогностических признаков подготовки крупных землетрясений, микросейсмрайонирования, прогнозирования техногенных процессов и их последствий до свершения непредсказуемых техногенных явлений и катастроф, наряду с другими мето-

дами 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 (ГДП) – это часть комплекса гравиметрических, геофизических исследований. Они имеют целью получение количественных характеристик стабильности взаимного положения точек земной поверхности во времени.

Важную роль при этом играют спутниковые методы позиционирования.

Их достоинствами являются: измерения с применением GPS-оборудования можно производить в любое время суток, при любой погоде и при отсутствии прямой оптической видимости между реперами; мониторинг смещений и деформаций можно производить без непосредственного присутствия оператора, так как в данном случае используются полностью цифровые технологии, и приборы работают в автоматическом режиме; в результате мониторинга в заранее заданный момент времени одновременно определяются все три координаты.

Организация геодинамического мониторинга на месторождениях для изучения динамики опасных процессов позволит контролировать возникновение критических природных деформационных процессов на ранней стадии их развития и своевременно реагировать на потенциальную опасность возникновения геодинамических событий, принимать меры по возникновению экономического ущерба, выбора соответствующих конструктивных и технологических решений, компенсирующих опасные воздействия.

Повышенный интерес к изучению геодинамических явлений проявляется, как правило, в зонах строительства и эксплуатации крупных инженерных сооружений, а также на территориях крупных городов. 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 адек-

ватного 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: общие сведения о планете Земля; геодинамические задачи геодезии; методы изучения современных движений земной поверхности; геодинамические полигоны; современные геодезические технологии изучения современных движений земной поверхности; техногенные полигоны.

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 главе приведены сведения о фигуре Земли, ее внутреннем строении, магнитном и электрическом полях; рассмотрены методы изучения фигуры и гравитационного поля Земли; даны общие положения по тектонике литосферных плит, землетрясениях.

Во второй главе рассматриваются геодинамические задачи геодезии, решающие 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 вопросы исследования глобальных и крупномасштабных геодинамических явлений геодезическими методами.

В третьей главе даются понятия о современных движениях земной поверхности, сведения о методах их изучения; рассматриваются геодезические методы изучения современных горизонтальных и вертикальных движений земной поверхности, использующие современные технологии цифрового нивелирования и спутникового позиционирования.

Содержание четвертой, пятой и шестой 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 их 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 магистранту уже хорошо известны и, что в последующем он перейдет к изучению углубленного курса – геодезические методы изучения геодинамических процессов.

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

В заключительной главе пособия освещены вопросы выполнения геодезических работ на техногенных полигонах. Рассмотрены цель и задачи комплексного геодинамического мониторинга на нефтегазовых месторождениях, его исходные предпосылки, типовой состав методов геодинамического мониторинга; высокоточные спутниковые наблюдения на техногенных геодинамических полигонах, обработка данных GPS-измерений. В шестой главе также рассмотрены методы повторного высокоточного нивелирования на техногенных полигонах и техногенные полигоны гидроэлектростанций и атомных станций.

Курс «Геодезические исследования геодинамических процессов» тесно связан с другими дисциплинами, изучаемыми бакалаврами и магистрантами инженерно-геодезической специальности, в частности с курсами: «Высшая геодезия», «Спутниковые навигационные системы», «Космическая геодезия», «Теория математической обработки геодезических измерений».

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЛАНЕТЕ ЗЕМЛЯ

1.1. Сведения о фигуре Земли

Планета Земля изучается с разных позиций. Состав, строение и эволюцию нашей планеты исследует наука геология, которая в своих выводах опирается на данные других наук – астрономии и географии, минералогии и петрографии, кристаллографии и палеонтологии. Исследованием физических свойств Земли в целом занимается геофизика, представляющая собой комплекс таких наук, как сейсмология, метеорология, гидрология и др.

Геодезия изучает геометрию Земли, ее размеры и форму. В ряде вопросов ей помогает гравиметрия – наука о силе тяжести в разных точках земной поверхности. Главной научно-технической задачей геодезии, как науки, является определение фигуры и внешнего гравитационного поля Земли и их изменение с течением времени.

Фигура Земли – это понятие или представление о форме и размерах Земли, как планете в целом, изменявшееся в ходе исторического развития знаний и определяемое по соглашению.

Современные знания о Земле, её форме, строении и месте во Вселенной формировались в процессе долгих исканий. Ещё в глубокой древности делалось много попыток дать общее представление о форме Земли. Пифагор, живший в VI веке до нашей эры, считал Землю шаром, придя к подобному решению умозрительным путем. Представления о шарообразности Земли складывались постепенно и потребовались века, чтобы сформулировать важнейшие доказательства того, что мы живем на шаре:

1. Всюду, где бы не находился наблюдатель, видимый горизонт имеет форму круга, если он не загорожен какими-то предметами.

2. При поднятии наблюдателя над земной поверхностью дальность горизонта увеличивается.

3. Постепенное появление из-за видимого горизонта приближающихся предметов. С приближением корабля к берегу сначала из-за горизонта появляется его мачта, а затем корпус.

4. Возможность кругосветных путешествий. Подвиг Магеллана и его спутников был расценен их современниками как очень веское доказательство шарообразности Земли.

5. Круговая форма земной тени на диске Луны во время лунных затмений.

Эратосфен (278 –196 гг. до н. э.) предпринял первую историческую попытку определить радиус Земли, как шара, по длине дуги меридиана между городами Александрией и Сиеной (ныне Асуан). Он воспользовался тем, что в день летнего солнцестояния Солнце в Сиене стоит точно в зените, высота его над горизонтом составляет 90° . Измеренная высота Солнца в Александрии в момент прохождения его в зените оказалась равной $82^{\circ} 48'$, что позволило определить разность широт между этими пунктами. Между Александрией и Сиеной существовал караванный путь длиной в 5000 стадий, т. е. приблизительно 800–900 км. Принимая Землю за шар, Эратосфен получил радиус земного шара, используя формулы

$$\frac{S}{S_{1^{\circ}}} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{1^{\circ}}, \quad R = \frac{180^{\circ}}{\pi} S_{1^{\circ}}, \quad (1)$$

где S – длина дуги меридиана; $S_{1^{\circ}}$ – длина дуги в 1° ; φ_1 и φ_2 – широты конечных точек дуги.

По сравнению с современными данными ошибка составляет примерно 100 км.

В средние века представления о шарообразности Земли и её движении вокруг Солнца отрицались, как противоречащие священному писанию, и объявлялись ересью. Идея шарообразности Земли вновь завоевала признание лишь в эпоху Возрождения, с началом Великих географических открытий.

Первые измерения размеров Земли были основаны на измерении длин дуг. Впоследствии это направление исследований развилось как градусные измерения. Новая эпоха градусных измерений начинается с 1614 г., когда голландский ученый Снеллиус (1580–1626 гг.) предложил метод триангуляции. При по-

мощи триангуляции можно точно определить на местности длины дуг в сотни и тысячи километров.

Классическим градусным определением следует считать работу Жака Пикара (Франция, 1620 – 1682 гг.). Была определена длина дуги от Парижа до Амьена, которая оказалась равной 153689 м, а в градусной мере – $1^{\circ} 23' 55''$. Таким образом, длина одного градуса составила 111212 м. Современное значение длины дуги одного градуса на широте Парижа равно 111221 м, т. е. измерения Пикара отличаются всего на 9 м. Радиус Земли определен им в 6372 км. Работами Жака Пикара завершается первый период в изучении фигуры Земли, длившийся свыше 2000 лет, когда считалось, что Земля является шаром с радиусом 6400 км.

Новый период в изучении фигуры Земли связан с именем великого английского ученого И. Ньютона (1642 – 1727 гг.). Ньютон доказал, что под действием центробежных сил фигура равновесия однородного жидкого тела – Земля в форме шара, становится эллипсоидом вращения с малым полярным сжатием 1: 230 (современное значение 1: 298,25).

Выводы Ньютона вызвали ожесточенные споры. Для установления истины Парижская академия наук организует две экспедиции для проведения градусных измерений: одну в экваториальную область в Перу в 1735 г., а другую – в приполярную – в Лапландию в 1736 г.

В Перу экспедиция в составе Буге, Годена и Лакондамина измерила длину дуги меридиана от $0^{\circ} 2' 30''$ северной широты до $3^{\circ} 4' 30''$ южной широты. Значение длины дуги одного градуса получено равным 110604 м. В полярной зоне (Скандинавия) работала другая экспедиция (Клеро, Мопертюи, Камюз, Цельсий). Длина одноградусной дуги на широте 66° оказалась равной 111917 м. Полученные результаты блестяще подтвердили теорию И. Ньютона.

После окончательного установления факта эллипсоидальной формы Земли большое развитие получили работы по градусным измерениям и выводам размеров земного эллипсоида. В XIX в. было сделано более 20 выводов размеров земного эллипсоида. Приведем некоторые результаты таких определений (табл. 1).

Параметры референц-эллипсоидов

Ученый	Государство	Год	a , м	a
Делабр	Франция	1800	6 375 653	1 : 334,0
Бессель	Германия	1841	6 377 397	1 : 299,2
Кларк	Великобритания	1866	6 378 206	1 : 294,98
Хейфорд	США	1910	6 378 388	1 : 297
Красовский	СССР	1940	6 378 245	1 : 298,3

В США, Канаде, Мексике, Франции пользуются размерами эллипсоида Кларка, в Финляндии и некоторых других странах – размерами эллипсоида Хейфорда, в Австрии – размерами эллипсоида Бесселя, в России, Казахстане и ряде других стран – размерами эллипсоида Красовского. Эллипсоид Делабра имеет историческое значение, как поверхность, на которой метр равен одной десятиmillionной части четверти Парижского меридиана.

Строго, говоря, истинная форма поверхности Земли с ее неровностями и непрерывными изменениями во времени бесконечно сложна. Определить ее для каждого момента практически невозможно.

Неравномерное распределение масс Земли продуцирует обширные пологие выпуклости и вогнутости, которые, сочетаясь, образуют возвышенности, углубления, впадины и другие формы. Заметим, что отдельные возвышения над Землей достигают высот более 8000 метров над поверхностью океана. Известно, что поверхность Мирового океана занимает 71 %, суша – 29 %; средняя глубина Мирового океана 3800 м, а средняя высота суши – 875 м. Из приведенных данных следует, большая часть Земли покрыта водой, что дает основание принять ее за уровенную поверхность и, в конечном итоге, за общую фигуру Земли. Фигуру Земли можно представить, вообразив поверхность, совпадающую с невозмущенной поверхностью океанов и морей, в каждой точке которой сила тяжести направлена по нормали к ней (по отвесной линии), т. е. поверхностью геоида. Под материками поверхность геоида определяется как поверхность, перпендикулярная силовым линиям.

Понятие геоид ввел немецкий физик И. Листинг в 1873 г. для обозначения формы Земли. Итак, геоид – это геометрическое тело, ограниченное уровневой поверхностью, которая совпадает с поверхностью морей и океанов при спокойном состоянии водных масс и мысленно продолжиться под материками так, чтобы направления сил тяготения пересекали ее под прямым углом. Отклонения физической поверхности Земли от геоида видны на рис. 1.

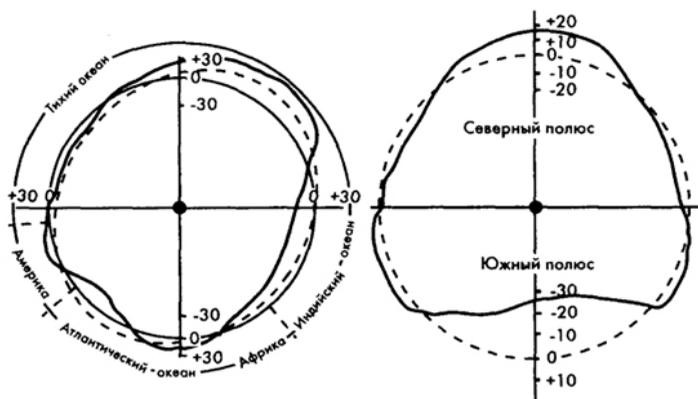


Рис. 1. Условные сечения Земли по нулевому (Гринвичскому) меридиану и экватору: пунктир – эллипсоид. Сплошная линия на первом сечении – геоид. На шкалах показаны отклонения физической поверхности Земли от геоида в километрах

Поверхность геоида замкнута, всюду выпукла, не имеет складок или каких-либо выделяющихся поверхностей. В то же время она (как и отвес) чутко «реагирует» не только на тяготение Земли и центробежную силу, но и на любые аномалии силы тяжести, вызванные, например, неоднородностью земной коры (в частности, залежами полезных ископаемых).

Поверхность геоида нельзя описать ни одной из математических формул. Из-за неравномерного размещения масс внутри Земли поверхность геоид имеет сложную, неправильную форму. Поэтому за математическую фигуру для Земли принимают эллипсоид вращения (сфероид), наиболее приближенный к геоиду (рис. 2).

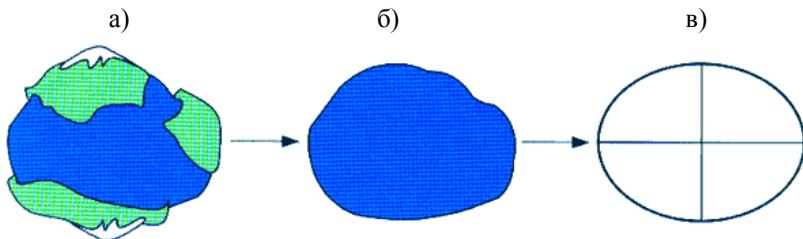


Рис. 2. Формы Земли:

а) поверхность планеты; б) геоид; в) эллипсоид вращения

Изучение формы геоида составляет главную задачу высшей геодезии. Эта задача состоит из двух частей: определения параметров эллипсоида близкого к геоиду, и положения отдельных точек геоида по отношению к эллипсоиду. В решении этих задач используются и гравиметрические данные. При этом они позволяют определять только форму, но не размеры геоида. Вот почему сочетание геодезических и гравиметрических методов при изучении фигуры Земли совершенно необходимо.

Теоретически форму геоида можно представить следующим образом. В каждой точке Земли существует так называемый потенциал силы тяжести – величина, характеризующая интенсивность, «напряженность» этой силы. Потенциал силы тяжести математически можно представить как сумму бесчисленного множества слагаемых, называемых гармониками. Чем больше слагаемых известно, тем точнее выразится потенциал силы тяжести, который и определяет форму геоида.

Первая гармоника отражает шарообразность Земли. Вторая гармоника отражает сплюснутость Земли. Третья гармоника указывает на то, что Земля отдаленно напоминает грушу, что отражается в движении искусственных спутников Земли, вызывая изменение расстояния перигея их орбит от центра Земли. Судя по данным спутников, Северный полюс поднят относительно эллипсоида примерно на 10 м (рис. 3), а Южный полюс опущен под эллипсоид на 30 м.

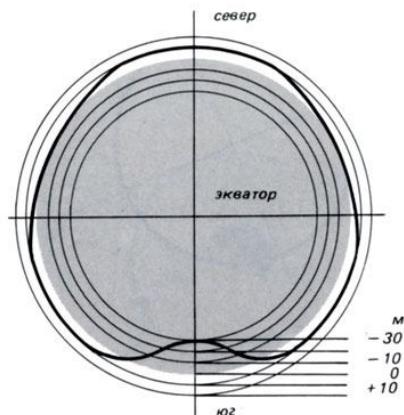


Рис. 3. Поверхность геоида

Наблюдения искусственных спутников Земли позволяют определять параметры различных гармоник и составлять карты превышений геоида над сфероидом (рис. 4).

Таким образом, общая амплитуда уроченной поверхности относительно поверхности сфероида составляет 200 м. Самая глубокая "яма" (-112 м) расположена в Индийском океане южнее полуострова Индостан, примерно на экваторе. Другие впадины отмечены к юго-востоку от Австралии (-50 м), в Тихом океане вблизи калифорнийского побережья (-56 м) и в районе Малых Антильских островов и знаменитого Бермудского треугольника (-60 м).

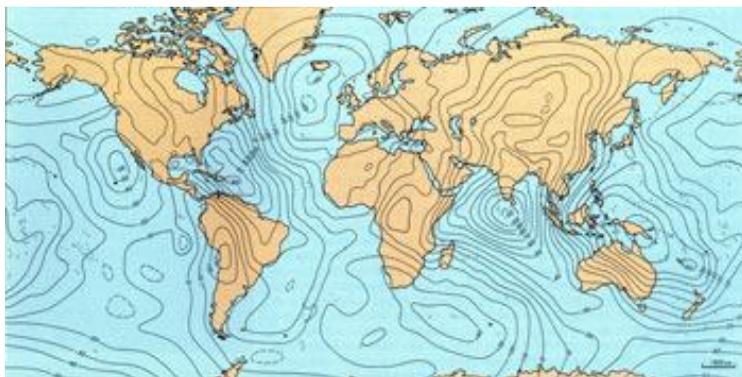


Рис. 4. Отклонение поверхности геоида от эллипсоида в метрах

Самые крупные вздутия находятся в районе Новой Гвинеи (+78 м), в Северной Атлантике (+68 м), в Индийском океане, к юго-востоку от оконечности Африки (+40 м) и в средней части Анд (+30 м).

Создаваемые ныне цифровые модели планетарного геоида строятся на основе анализа возмущения (уклонения от расчетных) орбит искусственных спутников Земли и данных наземных гравиметрических измерений.

Эллипсоид вращения, форма и размеры которого близки к форме и размерам геоида, называется земным. Размеры и форма эллипсоида вполне определяются двумя параметрами: большой полуосью a и сжатием α (или эксцентриситетом e).

$$\alpha = \frac{a - b}{a}, \quad e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}, \quad (2)$$

где b – малая полуось эллипсоида вращения.

Для практической реализации земной эллипсоид необходимо ориентировать в теле Земли определенным образом. При этом выдвигается общее условие: ориентирование должно быть выполнено таким образом, чтобы разности астрономических и геодезических координат были минимальными. Земной эллипсоид может подбираться так, чтобы данное условие было выполнено в некоторой области, стране или даже в группе стран. В этом случае ориентирование эллипсоида подчиняется следующим требованиям:

- 1) малая полуось эллипсоида должна быть параллельна оси вращения Земли;
- 2) поверхность эллипсоида должна находиться возможно ближе к поверхности геоида в пределах данной страны.

Эллипсоид, удовлетворяющий этим требованиям и принятый для обработки геодезических измерений законодательно, называется референц-эллипсоидом.

Для закрепления референц-эллипсоида в теле Земли необходимо задать геодезические координаты B_0, L_0, H_0 начального пункта геодезической сети и начальный азимут A_0 на сосед-

ний пункт. Совокупность этих величин называется исходными геодезическими датами.

Если подбирать эллипсоид для Земли в целом, то он должен удовлетворять следующим требованиям:

1) малая полуось должна совпадать с осью вращения Земли;

2) центр эллипсоида должен совпадать с центром масс Земли;

3) высоты геоида над эллипсоидом h (так называемые аномалии высот) должны подчиняться условию $\sum_1^{\infty} h_i^2 = \min$.

Эллипсоид, удовлетворяющий этим требованиям, называется общим земным эллипсоидом.

Поскольку требования к общему земному эллипсоиду на практике удовлетворяются с некоторыми допусками, а выполнение последнего в полном объеме вообще недопустимо, то в геодезии и смежных науках могут использоваться различные реализации общих земных эллипсоидов, параметры которых очень близки, но неодинаковы.

При ориентировании общего земного эллипсоида в теле Земли (в отличие от референц-эллипсоида) нет необходимости вводить исходные геодезические даты.

На территории СССР до 1946 г. использовался эллипсоид Ф.В. Бесселя, параметры которого были установлены для Западной Европы, наилучшим образом соответствовали ее территории, но были чрезмерно приближенными для европейско-азиатской части СССР. В связи с этим в 1940 г. Ф.Н. Красовским и А.А. Изотовым по результатам астрономо-геодезических работ, выполненных на территории СССР, Западной Европы и США, были получены параметры нового эллипсоида, позднее принятые для установления единой системы геодезических координат для всей территории СССР и некоторых других стран. Начальным пунктом этой системы является центр Круглого зала Пулковской обсерватории; в качестве начального принят азимут от центра Круглого зала на пункт Бугры Саблинской базисной сети. Этот эллипсоид в 1946 г. был принят для территории СССР в качестве референц-эллипсоида.

Использование в последние десятилетия методов космической геодезии позволило уточнить параметры Земли. С помощью искусственных спутников земли (ИСЗ) были получены тысячи спутниковых измерений, выполненных на суше и в море. После их математической обработки были уточнены параметры общего земного эллипсоида, получившего название ПЗ–90 (параметры Земли 1990 г., Россия). В США также были проведены соответствующие работы и получены параметры общего земного эллипсоида, названного WGS–84 (World Geodetic System, 1984г.). Эллипсоиды ПЗ–90 и WGS–84 довольно близки между собой, но все же имеют различия.

Параметры общеземных эллипсоидов приведены в таблице 2 [1].

Таблица 2

Параметры общеземных эллипсоидов

Название эллипсоида	Год	Большая полуось a , м	Полярное сжатие α	Метод определения параметров эллипсоида
WGS-84	1984	6 378 137	1:298,257 223 563	Спутниковые измерения
ПЗ-90	1990	6 378 136	1:298,257 839 303	Спутниковые измерения

Наиболее широкое использование в настоящее время получил геоцентрический (глобальный) эллипсоид WGS–84. Он служит основой для измерения местоположений во всем мире.

Поддержка параметров общеземных и референцных эллипсоидов и установленных на их основе координатных систем осуществляется с помощью пунктов опорных геодезических сетей, постоянными наблюдениями за спутниками, определением их эфемерид, службой времени и др. В последние годы (конец XX и начало XXI вв.) параметры фигуры Земли и внешнего гравитационного потенциала определены с использованием космических объектов и применением астрономо-геодезических и гравиметрических методов исследований так надежно, что теперь речь идет об оценке их измерений во времени.

1.2. Методы изучения фигуры и гравитационного поля Земли

Основными методами изучения фигуры Земли являются:

1. Астрономо-геодезический метод, основанный на использовании геодезических и астрономических измерений на поверхности Земли.

2. Гравиметрический метод, использующий измерение ускорения силы тяжести в различных точках земной поверхности.

3. Методы космической геодезии, основанные на использовании наблюдений искусственных и естественных космических объектов, а также далеких космических аппаратов.

Астрономо-геодезический метод. Астрономо-геодезический метод является геометрическим методом изучения фигуры Земли и базируется на так называемых градусных измерениях (основные геодезические работы), заключающихся в точном определении длин дуг меридианов и параллелей. Кроме того, на концах этих дуг выполняются астрономические определения широт и долгот.

Для определения формы и размеров эллипсоида вращения, принимаемого за фигуру Земли, необходимо определить два его элемента: либо обе полуоси a и b , либо одну полуось и сжатие α , либо полуось a и эксцентриситет e . При этом сжатие и эксцентриситет определяют сплюснутость эллипсоида, а полуоси – его размеры. Следовательно, одной дуги недостаточно.

Длина дуги S_1 является функцией параметров эллипсоида a и α и широт ее концов B_1 и B_2 , т. е.

$$S_1 = f_1(a, \alpha, B_1, B_2). \quad (3)$$

Если S_1 будет измерена, а B_1 и B_2 получены из астрономических определений, то в уравнении (3) будут два неизвестных параметра a и α . Для их определения надо иметь минимум еще одно такое же уравнение, которое может быть составлено в случае измерения второй дуги

$$S_2 = f_2(a, \alpha, B_3, B_4). \quad (4)$$

Первые градусные измерения приводили к определению длины дуги меридиана по формуле (3). Из результатов определений по методу дуг определяют размеры и ориентировку эллипсоида, наилучше подходящего к профилю геоида по использованным дугам градусных измерений.

В нижеследующей таблице 3 перечислены главнейшие геодезические измерения по меридианам.

Таблица 3

Градусные измерения по меридианам

Наименования дуг	Фамилии главных участников	Время работ, годы	Широты конечных пунктов
Перуанская	Бугер, Лакондамин, Годен и Уллоа	1735-1744	3°7'3"; Тарки - 3°4'32", Котекки +0°2'31"
Шведская	Сванберг и Овербом	1801-1803	Малёрн - 65°31'30", Патавара 67°8'50";
Ост-Индская	Ламбгон, Эверест, Уог и Уокер	1802-1874	Куданкалам - 8°12'10", Шахпур - 32°1'34"
Англо-французская:	Мудж, Рой, Джемс, Кларк, Делабр, Мешен, Био и Араго	1792-1854	Форментера - 38°39'53", Саксаворф - 60°49'37"
Русско-Скандинавская	Струве, Теннер, Зеландер и Ганстен	1816-1851	Старо-Некрасовка-45°20'3" Фугленес -70°40'11"
Голштинская	Шумахер	1820-1823	Ланенбург - 53°22 '17", Лизабель - 54°54'10"
Ганноверская	Гаусс	1821-1824	Гёттинген - 51°31'48", Альтона - 53°32'45"
Прусская	Бессель	1831-1834	1°30'29" Трунц - 54°13'11", Мемель - 55°43 '40"
Южноафриканская	Маклир	1842-1852	4°36'48"; мыс Доброй Надежды - 34°21'6"

Геодезических измерений по параллелям производилось меньше, чем по меридианам, потому что астрономическая часть работы по параллелям исполнялась с меньшей точностью, пока для определения долгот не начали пользоваться телеграфом. В таблице 4 перечислены главнейшие геодезические измерения дуг параллелей.

Таблица 4

Градусные измерения по параллелям

Наименования дуг	Фамилии главных участников	Время работ, годы	Широты конечных пунктов
Франко-итальянская	Карлини, Плана и Бруссо	1821–1823	12°59'4"; Бордо и Падуа
Европейская по 52°	Форш и Жилинский	1827–1872	63°31'8"; Хаверфордвест и Орск
Североамериканская по 42°	Комсток	1841–1882	11°47'40"; Уилло-Спринг и Мансвилль
Алжирская	Перрье	1867–1879	9°36'35"; Бон и Намур
Индийская	Уокер	1872–1877	10°28'19"; Визагапатам и Бомбей
Новороссийская по 47½°	Вронченко и Васильев	1849–1856 и 1877–1890	19°11'55"; Кишинев и Астрахань

По мере накопления результатов геодезических измерений они подвергались тщательной обработке, и различные ученые выводили из существующих измерений фигуру и размеры земли. В таблице 5 приведены результаты лучших обработок геодезических измерений.

Таблица 5

Результаты обработок геодезических измерений

Автор и сочинение, где помещены исследования	Вальбек, 1819 «De forma et magnitudine telluris»	Эри, 1830 «Figure of the Earth. Encyclopädia Metropolitana».	Бессель, 1841 «Astronomische Nachrichten»	Кларк, «Geodesy, Оксф»
Большая полуось экватора	6 376 896	6 377 490	6 377 397	6 378 249
Малая, или полярная, полуось	6 355 832	6 356 184	6 356 079	6 356 515
Сжатие	1/302,78	1/299,33	1/299,15	1/293,47

Для определения элементов земного эллипсоида (его полуосей и сжатия) в течение XIX в. градусные измерения были проведены во многих странах. Величайшим градусным измерением XIX в., выполненным под руководством первого директора Пулковской обсерватории В. Я. Струве, следует считать триангуляционный ряд, насчитывающий 258 треугольников (рис. 5). Общая протяженность «дуги Струве» равнялась почти 3000 км (более 25°). Она шла от Севера Норвегии, через Швецию, Прибалтику, по западным районам России и выходила в Бессарабии к Дунаю. Работа длилась 40 лет, еще 5 лет ушло на обработку результатов измерений и их описание.



а)

б)



Рис. 5. Дуга Струве: а) ряд триангуляции; б) пункт дуги

Из других градусных измерений XIX в. отметим англо-французские измерения от Шетлендских островов (Атлантика, Север Англии) до Балеарских островов (Средиземное море близ Испании), т. е. дугу меридиана длиной около 25° , а также две «индийские» дуги меридианов длиной примерно 21 и 11° , т. е. более 2000 и 1000 км соответственно. Все эти и более короткие дуги меридианов использовались геодезистами для вывода размеров эллипсоида, наилучшим образом приближающегося к реальной фигуре Земли.

Однако к концу XIX столетия выявились существенные недостатки проведенных ранее исследований. Широты и долготы точек земной поверхности, вычисленные на основании полученных размеров земного эллипсоида, не совпадали с широтами и долготами, выведенными из астрономических наблюдений. Причина таких расхождений ныне известна под названием «уклонения отвесных линий по широте и долготе». Оказывается, истинная фигура Земли не может быть представлена эллипсоидом вращения. В действительности наша планета имеет форму, зависящую от распределения силы тяжести на ней, т. е. от внутреннего строения Земли и определяется формой геоида.

Таким образом, к концу XIX века выявились новые задачи градусных измерений. В 1899 г. Русская, Французская и Шведская академии наук договорились предпринять необходимые исследования в северных и южных широтах. Русская и Шведская академии наук взяли организовать совместные экспедиции по градусным измерениям на Шпицберген, а Французская – в Перу. Одновременно было намечено провести работы того же порядка и на других территориях, в частности выполнить измерение дуги меридиана от мыса Доброй Надежды до Дуная и измерение дуги параллели в Центральной Африке.

По данным шпицбергенского градусного измерения величина сжатия Земли получилась равной $1:297,2$, а величина большой полуоси – $6378\ 266$ м.

Эти величины достаточно близки к соответствующим величинам эллипсоида Ф. Н. Красовского (сжатие $1:298,3$ и большая полуось $6378\ 245$ м), принятого в СССР с 1946 г. В русской части сети в шести точках были определены ускорения силы

тяжести. Экспедицию на Шпицберген – первый опыт комплексного проведения астрономических, геодезических и гравиметрических работ в высоких широтах Арктики, по праву можно считать крупнейшим научным предприятием начала XX в. Основной научной задачей шпицбергенских градусных измерений являлось уточнение размеров земного эллипсоида и величины его сжатия, а также местное определение геоида в этой части северного архипелага.

Вывод общего земного эллипсоида требует наличия градусных измерений в виде обширных астрономо-геодезических сетей на всей поверхности Земли или значительной ее части в соединении с гравиметрическими наблюдениями на суше и на море. При этом должны использоваться геодезические сети, покрывающие сплошь целые государства и континенты. Их совместная обработка позволяет вывести размеры земного эллипсоида под условием наилучшего приближения поверхности определяемой фигуры к поверхности геоида. Этот метод называется методом площадей.

Последние выводы размеров земного эллипсоида астрономо-геодезическим методом основаны на использовании метода площадей, при этом рассматриваются пункты высокоточных геодезических сетей, положение которых определено не только наземными, но и космическими методами.

Гравиметрический метод относится к физическим методам определения фигуры Земли. Первоначально задача изучения фигуры Земли этим методом сводилась к определению сжатия земного эллипсоида. В настоящее время она заключается в использовании измерений ускорения силы тяжести для определения гравитационного поля Земли и ее полярного сжатия.

В гравиметрическом методе эллипсоид рассматривается как физическое тело, распределение силы тяжести, на поверхности которого наилучшим образом приближает реальные гравиметрические измерения. Причем эллипсоид, масса которого равна массе реальной Земли и который обладает таким свойством распределения силы тяжести на поверхности, называется нормальным земным эллипсоидом. Отличия значений ускорения силы тяжести в любой точке реальной Земли от «нормаль-

ного значения» называются аномалиями силы тяжести, их геодезисты получают из гравиметрических измерений.

Отличия же реальной фигуры Земли от поверхности референц-эллипсоида определяются высотами точек земной поверхности над ним. Геодезические высоты получают в результате высокоточного нивелирования, а также из величин уклонений отвеса в каждой точке Земли. Уклонения отвеса характеризуют отличие координат, связанных с нормалью к реальной поверхности Земли, от координат, связанных с нормалью к референц-эллипсоиду (или к нормальному сфероиду).

Основа теории определения формы Земли по результатам измерения силы тяжести была заложена французским математиком Клеро, который доказал теорему, устанавливающую изменение силы тяжести на поверхности сфероида в зависимости от широты места и сжатия Земли.

Установленные Клеро зависимости имеют вид:

$$\gamma_B = \gamma_e (1 + \beta \sin^2 B), \quad (5)$$

$$\beta = \frac{5}{2} q - \alpha, \quad (6)$$

где γ_B – ускорение силы тяжести в текущей точке поверхности с широтой B ; γ_e – ускорение силы тяжести на экваторе; q – отношение центробежной силы тяжести на экваторе к ускорению силы тяжести на экваторе, равное 1/288.

Из формулы (6) определяется сжатие земного эллипсоида.

$$\alpha = \frac{5}{2} q - \beta. \quad (7)$$

Таким образом, теорема Клеро позволяет определять полярное сжатие земного эллипсоида независимо от распределения плотностей внутри Земли и от его геометрических элементов – большой и малой полуосей, путем определения силы тяжести на поверхности Земли.

Гравиметрический метод также позволяет вычислить значение нормальной силы тяжести как на поверхности уровня эллипсоида

липсоида, так и во внешнем пространстве и путем сравнения с действительным ее значением изучить гравитационное поле Земли.

Для обеспечения строгости обработки градусных измерений (триангуляций) Ф.Н. Красовский предложил все результаты измерений на местности точно проектировать на поверхность референц-эллипсоида. Величинами, определяющими редукции непосредственных измерений на земной поверхности к соответствующим элементам на поверхности референц-эллипсоида являются: расстояния от точек земной поверхности до поверхности эллипсоида по нормальям к последнему и отклонения отвесной линии в каждом геодезическом пункте. Для решения этой задачи М. С. Молоденский разработал метод астрономо-гравиметрического нивелирования, позволяющий с заданной точностью вычислять названные величины на основе совместного использования результатов астрономо-геодезических и гравиметрических измерений и без знания аномалий силы тяжести для всей поверхности Земли.

Теория Молоденского и разработанные на ее основе конкретные методы изучения фигуры Земли предусматривают совместное использование в качестве опытных данных всех видов наземных измерений: угловых, линейных, нивелирных, гравиметрических и астрономических. Каждый из указанных видов измерений стал обязательной составной частью комплекса основных геодезических работ. В последние годы сюда присоединились методы космической геодезии. Таким образом, современный этап научных исследований и практических работ по определению фигуры Земли характеризуется органическим сочетанием и взаимосвязью геометрического и физического методов решения всех геодезических задач на основе общей математически строгой теории. По двум независимым путям определения формы Земли – геометрическому и физическому, получено единое заключение о том, что фигура Земли по форме весьма близка к эллипсоиду вращения, но не совпадает с ним.

При этом геометрический метод основан на использовании результатов измерения геометрических элементов поверхности Земли (длин линий, углов и направлений), а физический использует измерение ускорения силы тяжести на земной поверхности.

Фигура и гравитационное поле Земли тесно взаимосвязаны и их изучение представляет собой по существу одну задачу. Сложная структура гравитационного поля, обусловленная неправильностями фигуры Земли и особенностями распределения плотностей масс, создает значительные трудности при определении потенциала силы тяжести W . Задача определения потенциала W существенно облегчается, если гравитационное поле Земли представить в виде двух полей: основного, или нормального и остаточного, или аномального и каждое из них изучать отдельно.

За физическую модель Земли при этом принимают так называемый уровенный эллипсоид вращения, внешняя поверхность которого является уровенной и сила тяжести в каждой точке ее направлена по нормали к ней.

Центр уровенного эллипсоида совмещают с центром масс Земли, а ось его вращения – с осью вращения Земли. Гравитационное поле, создаваемое уровенным эллипсоидом на его поверхности и во внешнем пространстве, называют нормальным гравитационным полем, а силу тяжести – нормальной и обозначают буквой γ .

Определив параметры уровенного эллипсоида, можно вычислить нормальный потенциал U и другие элементы нормального поля силы тяжести на его поверхности и во внешнем пространстве. Приняв поверхность уровенного эллипсоида за отсчетную, задачу изучения фигуры Земли можно свести к определению отклонений ее физической поверхности от поверхности эллипсоида, а задачу определения потенциала W реальной силы тяжести к определению небольших разностей $T=W-U$, называемых возмущающим потенциалом Земли в точках земной поверхности.

Уровенный эллипсоид, принимаемый за физическую модель Земли при определении ее фигуры и гравитационного поля, принято называть Нормальной Землей. Потенциал притяжения V_0 Нормальной Земли (уровенного эллипсоида) имеет вид

$$V_0 = \frac{fM_0}{r} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^{2n} j_{2n}^0 P_{2n}(\sin \varphi) \right], \quad (8)$$

где индексом «0» отмечены параметры Нормальной Земли; f – универсальная гравитационная постоянная; M_0 – масса уровня эллипсоида; r – геоцентрический радиус-вектор точек его поверхности; a – большая полуось эллипсоида; J_{2n}^0 – зональные гармонические коэффициенты второй степени при полиномах Лежандра $P_{2n}(\sin \Phi)$.

Из-за особой важности некоторые параметры Нормальной Земли получили название фундаментальных геодезических постоянных. К ним в настоящее время относят следующие величины: fM , a , J_2 , ω , где ω – угловая скорость вращения Земли.

Методы космической геодезии. Появление спутников и новых возможностей исследования гравитационного поля существенно расширило круг задач определения фигуры Земли.

С целью определения параметров внешнего гравитационного поля и фигуры Земли в космической геодезии используются динамические методы, заключающиеся в использовании теории движения искусственных спутников Земли (ИСЗ), космических летательных аппаратов и Луны в поле притяжения Земли и изучении возмущений их орбит.

Эти методы основаны на том, что движение вышеперечисленных объектов, происходит по орбитам, определяемым земным гравитационным полем, которое в свою очередь зависит от формы Земли и распределения масс в ее теле.

Движение ИСЗ происходит по эллипсу, один из фокусов которого совпадает с центром масс Земли (начало координат). Ближайшая к началу координат точка эллипса называется перигеем, наиболее удаленная от него – апогеем. Форма и размеры эллипса определяются двумя элементами: большой полуосью a и эксцентриситетом e . Плоскость орбиты ИСЗ пересекает плоскость земного экватора по линии, проходящей через начало координат, – эта линия называется линией узлов. Положение плоскости орбиты ИСЗ в пространстве неизменно и определяется относительно плоскости земного экватора двумя углами: долготой восходящего узла Ω и углом взаимного наклона этих двух плоскостей i . Долгота Ω есть угол между направлением из центра Земли на точку весеннего равноденствия и направлением линии узлов.

Расположение эллипса орбиты ИСЗ в орбитальной плоскости характеризуется углом между большой осью эллипса (эта линия, соединяющая перигей и апогей и проходящая через начало координат, называется линией апсид) и линией узлов (угловое расстояние перигея от узла – ω). Перечисленные пять независимых кеплеровых элементов характеризуют геометрию невозмущенной орбиты (рис. 6). Шестой элемент определяет собственно движение ИСЗ по орбите. Обычно это или момент прохождения спутником точки перигея τ , или значение угловой координаты ИСЗ на заданный момент времени (обычно это начальный момент).

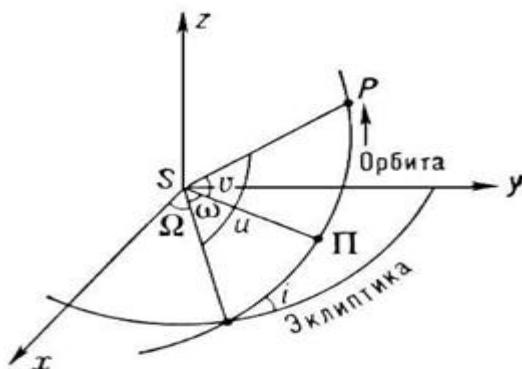


Рис.6. Элементы невозмущенной орбиты ИСЗ

Потенциал гравитационного поля Земли (геопотенциал) отличается от потенциала точечной массы, равной массе Земли и называется возмущающим потенциалом. Возмущающий потенциал обычно записывают в виде бесконечной суммы, каждое слагаемое которой напоминает собой тригонометрическую функцию (синус), называемую гармоникой. Сумма эта двойная, так как ее слагаемые определены на поверхности некоторой сферы, а точка на сфере задается двумя координатами (например, широтой и долготой).

Коэффициенты при этих слагаемых называются гармоническими коэффициентами (C_{nm} и S_{nm}). Сферические гармоники, слагающие геопотенциал, отражают собой определенные особенности гравитационного поля Земли. Каждая из гармоник

«отвечает» за одну какую-либо особенность. Главная гармоника (первое слагаемое) с коэффициентом $C_{2,0}$ ($n=2, m=0$) определяет полярное сжатие – основное отличие Земли от однородного шара. Следующая гармоника с $C_{3,0}$ ($n=3, m=0$) появляется из-за неодинаковой сплюснутости Северного и Южного полушариев. Старшая гармоника с ненулевым вторым индексом ($n=2, m=2$) характеризует сплюснутость экватора.

Под влиянием возмущений меняются форма и размер орбиты, плоскость орбиты начинает медленно двигаться, меняя угол наклона и долготу узла, линия апсид движется относительно линии узлов. Сравнивая наблюдаемые и предвычисленные по аналитической (или численной) теории положения ИСЗ в пространстве можно получать уточненные значения гармонических коэффициентов.

Элементы спутниковых орбит испытывают вековые и периодические возмущения. Вековыми называются возмущения, пропорциональные времени. Они вызываются зональными гармониками геопотенциала и имеются у элементов орбиты ω , Ω и τ . Остальные элементы имеют только периодические возмущения. Полярное сжатие Земли можно определить через вторую зональную гармонику C_{20} по формуле

$$\alpha = \frac{\omega^2 r_0^3}{2\mu - \frac{3}{2}C_{20}}, \quad (9)$$

где ω – угловая скорость вращения Земли; μ – гравитационная постоянная Земли.

Современные технологии определения гармонических коэффициентов геопотенциала базируются на совместной обработке спутниковых, гравиметрических и астрономо-геодезических данных. В общем случае эта задача решается в два этапа. На первом этапе определяют гармонические коэффициенты геопотенциала только по спутниковым траекторным измерениям, получая спутниковую модель. На втором этапе вводят комбинированную модель с использованием наземных данных.

Выше указывалось, что в геодезической практике за фигуру Земли принимается геоид, наилучшим образом представляющий

средний уровень Мирового океана. По современным данным, высоты геоида над общим земным эллипсоидом меняются в пределах от -107 до 87 м. Для точного определения высот геоида необходимо знать внутреннее строение Земли. М.М. Молоденский предложил вместо геоида использовать близкую к нему поверхность, математически строго определяемую значениями геопотенциала на земной поверхности (квазигеоид). В настоящее время для определения высот квазигеоида используются и методы космической геодезии – спутниковая альтиметрия.

Спутниковые альтиметрические исследования дали прямые измерения топографии водной глади поверхности океанов, которая совпадает с геоидом (квазигеоидом) с точностью ± 1 м.

Для решения многих научных и практических задач геодезии, картографии и других в качестве модели Земли принимают земной эллипсоид. Знание параметров земного эллипсоида, его положения в теле Земли, а также гравитационного поля Земли имеет большое значение. Эти параметры изучаются путём наземных астрономо-геодезических и гравиметрических измерений и методами спутниковой геодезии. Геометрические и физические характеристики Земли приведены в табл. 6.

Таблица 6
Геометрические и физические характеристики Земли

Характеристики Земли	Значение характеристик
Экваториальный радиус	6378,160 км
Полярный радиус	6356,777 км
Сжатие земного эллипсоида	1:298,25
Средний радиус	6371,032 км
Длина окружности экватора	40075,696 км
Поверхность	$510,2 \times 10^6$ км ²
Объём	$1,083 \times 10^{12}$ км ³
Масса	5976×10^{21} кг
Средняя плотность	5518 кг/м ³
Ускорение силы тяжести (на уровне моря)	
а) на экваторе	$9,78049$ м/сек ²
б) на полюсе	$9,83235$ м/сек ²
в) стандартное	$9,80665$ м/сек ²
Момент инерции относительно оси вращения	$8,104 \times 10^{37}$ кг \times м ²

1.3. Некоторые сведения о внутреннем строении Земли

Определение фигуры Земли зависит от внутреннего строения и распределения масс, составляющих нашу планету.

Информацию о внутреннем строении планеты получают, исследуя закономерности распространения сейсмических волн по земной поверхности при землетрясениях; строение метеоритов, являющихся остатками «строительного материала» планеты; химический состав редких пород, формирующих мантию; гравитационное и магнитное поля Земли; колебание земных полюсов; тепловые потоки Земли и т. д. Эти данные позволяют сделать вывод о том, что Земля состоит из четырех различных концентрических слоев: земная кора, мантия, внешнее и внутреннее ядро.

Изучение путей и скорости распространения в недрах Земли сейсмических волн позволили разработать сейсмическую модель её внутреннего строения. Широко известная модель внутреннего строения Земли (деление ее на ядро, мантию и земную кору) разработана сейсмологами Г. Джеффрисом и Б. Гутенбергом еще в первой половине XX века. Решающим фактором при этом оказалось обнаружение резкого снижения скорости прохождения сейсмических волн внутри земного шара на глубине 2900 км при радиусе планеты 6371 км (рис. 7). Скорость прохождения продольных сейсмических волн непосредственно над указанным рубежом равна 13,6 км/с, а под ним – 8,1 км/с. Это и есть граница мантии и ядра. Соответственно радиус ядра составляет 3471 км. Верхней границей мантии служит сейсмический раздел Мохоровичича, выделенный югославским сейсмологом А. Мохоровичичем (1857–1936 г.г.) еще в 1909 году. Он отделяет земную кору от мантии. На этом рубеже скорости продольных волн, прошедших через земную кору, скачкообразно увеличиваются с 6,7–7,6 до 7,9–8,2 км/с, однако происходит это на разных глубинных уровнях. Под континентами глубина раздела (т. е. подошвы земной коры) составляет первые десятки километров, причем под некоторыми горными сооружениями (Памир, Анды) может достигать 60 км, тогда как под океанскими впадинами, включая и толщу воды, глубина равна лишь 10–12 км. Вообще же земная кора в этой схеме вырисовывается как

тонкая скорлупа, в то время как мантия распространяется в глубину на 45 % земного радиуса.

Твердую оболочку Земли называют литосферой. Ее можно сравнить со "скорлупой", охватывающей всю поверхность Земли. Но эта "скорлупа" как бы растрескалась на части и состоит из нескольких крупных литосферных плит, медленно перемещающихся одна относительно другой. По их границам концентрируется подавляющее большинство очагов землетрясений. Верхний слой литосферы – эта земная кора, минералы которой состоят преимущественно из окислов кремния и алюминия, окислов железа и щелочных металлов. Земная кора имеет неравномерную толщину: 35–65 км на континентах и 6–8 км под дном океанов.

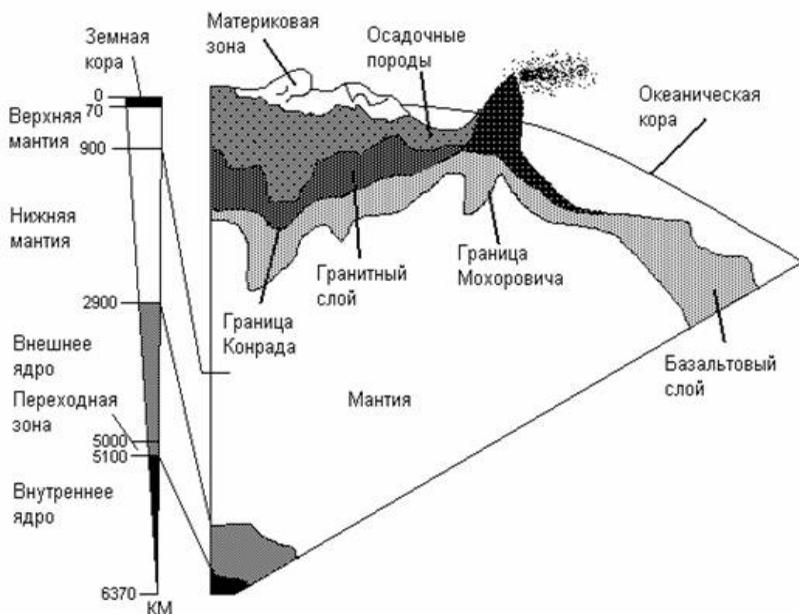


Рис. 7. Схематическое внутреннее строение Земли

Земная кора – самая неоднородная и сложно построенная. Из нескольких типов земной коры преобладающее распространение имеют материковая и океаническая. В строении матери-

ковой коры различают три слоя: верхний – осадочный (от 0 до 20 км), средний, называемый условно «гранитным» (от 10 до 40 км), и нижний – «базальтовый» (от 10 до 70 км), отделяющийся от «гранитного» поверхностью Конрада.

Мантия составляет 67 % всей массы Земли. Выше границы 660 км находится верхняя мантия, а ниже, соответственно, нижняя. Возможно и то, что эти две части мантии имеют разный состав и физические характеристики. Теплоперенос в мантии происходит методом медленной конвекции, средством пластической деформации минералов. Скорости движения вещества при мантийной конвекции составляют порядка пары сантиметров в год.

На глубине 120–250 км под материками и 60–400 км под океанами залегает слой мантии, называемой астеносферой. Здесь вещество находится в близком к плавлению состоянию, вязкость его сильно понижена.

Все литосферные плиты как бы плавают в полужидкой астеносфере, как льдины в воде. Более толстые участки земной коры, а также участки, состоящие из менее плотных пород, поднимаются по отношению к другим участкам коры. В то же время дополнительная нагрузка на участок коры, например, вследствие накопления толстого слоя материковых льдов, как это происходит в Антарктиде, приводит к постепенному погружению участка. Такое явление называется изостатическим выравниванием.

Ниже астеносферы, начиная с глубины около 410 км, "упаковка" атомов в кристаллах минералов уплотнена под влиянием большого давления. Резкий переход обнаружен сейсмическими методами исследований в 1906 г. на глубине 2880 – 2920 км. Выше этой отметки плотность вещества составляет $5\,560\text{ кг/м}^3$, а ниже ее – $10\,080\text{ кг/м}^3$. Здесь начинается земное ядро, или, точнее говоря, внешнее ядро, так как в его центре находится еще одно – внутреннее ядро, радиус которого 1250 км. С существованием жидкого внешнего ядра связывают происхождение магнитного поля Земли.

Граница раздела внешнего ядра характерна тем, что на ней резко падает скорость продольной волны от 13,6 км/с до 8,1 км/с. Поперечная волна вообще через внешнее ядро не проходит, что говорит о том, что оно жидкое. Твердое, внутреннее

ядро обнаружила Леман (Дания) в 1936 году. Она показала, что оно расположено на глубине приблизительно равной 5000 км.

С глубиной в Земле изменяются значения плотности, давления, силы притяжения, упругих свойств вещества, вязкости и температуры (рис. 8). Средняя плотность земной коры в целом – 2,8 т/м³. Средняя плотность осадочного слоя коры – 2,4–2,5 т/м³, «гранитного» – 2,7 т/м³, «базальтового» – 2,9 т/м³. На границе земной коры и мантии (поверхность Мохоровичича) плотность увеличивается скачком от значений 2,9–3,0 т/м³ до 3,1–3,5 т/м³. Далее она плавно растёт до 12,5 т/м³ в центре Земли.

Ускорение силы тяготения в Земле не изменяется скачком. До глубины 2500 км оно отклоняется от значения 10 м/сек² менее чем на 2 %, на границе ядра равно 10,7 м/сек² и далее плавно убывает до нуля в центре Земли.

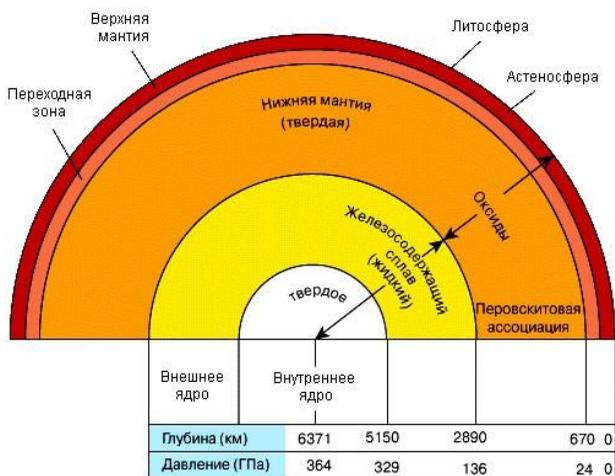


Рис.8. Строение Земли и изменение давления с глубиной

По данным о плотности и ускорении гравитации вычисляется давление, которое непрерывно растёт с глубиной. Зная плотность и скорости сейсмических волн, вычисляют величины, характеризующие упругие свойства материала Земли.

В земной коре и верхней мантии температура повышается с глубиной. В мантии температура под материковой корой предполагается близкой к 600–700 °С. Оценка температур для более глубоких слоев мантии и ядра Земли носит весьма предположительный характер. По-видимому, в ядре она не превышает 4000–5000 °С.

При такой температуре и давлении вышележащих слоев до 4 млн. атмосфер в центре упругость внутренних частей ядра в 2,5 раза больше упругости стали. При этих условиях вещество в ядре Земли находится в особом "металлическом" состоянии. Плотность в центре Земли около 13 г/см³.

Земная кора – единственная из внутренних геосфер, доступная непосредственному изучению.

Геодезия играет важную роль в изучении строения Земли, получая высокоточные измерения для количественной фиксации и характеристики происходящих деформаций на земной поверхности. Неправильности в распределении масс земной коры отражают отступление реального гравитационного поля от нормального. При этом земная кора составляет незначительную часть от объема Земли. Отсюда следует, что отступления геоида от земного эллипсоида и соответственно отклонения отвесных линий являются малыми величинами, что облегчает их изучение.

1.4. Гравитационное поле Земли

Изучение реального гравитационного поля Земли на основе результатов геодезических измерений позволяет решать основную задачу геодезии – определение фигуры Земли.

Внешним гравитационным полем Земли называют совокупность сил тяжести \vec{g} в окружающем Землю пространстве и на ее поверхности. На материальную точку поверхности Земли действуют две силы: сила земного притяжения \vec{F} и центробежная сила \vec{Q} , направленная перпендикулярно оси вращения. Равнодействующая этих сил называется силой тяжести.

$$\vec{g} = \vec{F} + \vec{Q}; \quad (10)$$

$$F = f \frac{mM}{R^2}; \quad (11)$$

$$Q = m\omega^2 \rho, \quad (12)$$

где m – масса точки А; M, R – масса и радиус Земли, $f = 6.7 \cdot 10^{-8}$ – постоянная тяготения; ρ – расстояние точки от оси вращения, ω – угловая скорость вращения Земли.

Основная ориентирная линия при всех видах геодезических измерений – отвесная линия, т. е. направление силы тяжести.

Значение силы тяжести определяется главным образом силой притяжения, даже на экваторе, где центробежная сила достигает максимума, отношение центробежной силы к силе притяжения равно 1/288. Поэтому изучение гравитационного поля Земли фактически сводится к изучению силы притяжения Земли.

В основе теории изучения гравитационного поля Земли лежат основные законы динамики и закон всемирного тяготения.

Сила тяжести характеризуется ускорением, которое приобретает свободно падающее тело. Единица ускорения 1 гал = 1 см/сек².

Приборы, служащие для измерения силы тяжести называются гравиметрами.

Свойства пространства вокруг масс и их взаимодействие можно изучать, вводя понятие потенциальной энергии. Согласно закону всемирного тяготения Ньютона, сила взаимного притяжения точечных масс m и M составляет

$$F = f \frac{mM}{R^2}. \quad (13)$$

Если расстояние между двумя массами увеличится на бесконечно малую величину, то будет совершена элементарная работа. С другой стороны, эта работа равна потере потенциальной энергии при $m=1$ $V = fM / r$. Согласно второму закону механики $F = mW$, тогда ускорение $W = -dV / dr$. Таким обра-

зом, градиент потенциала, взятый с обратным знаком равен ускорению, приобретаемому единичной массой вследствие взаимного притяжения с массой M на расстоянии r . По определению потенциальной энергии ее бесконечно малое приращение, взятое с обратным знаком, численно равно работе, совершаемой силой притяжения при бесконечно малом перемещении единичной массы в заданном направлении.

Потенциал силы тяжести равен сумме потенциалов притяжения и центробежной силы

$$W = V + U. \quad (14)$$

Если силу тяжести или ускорение обозначим через \mathbf{g} , то составляющие по осям координат будут $g_x = -\frac{\partial W}{\partial x}, \dots$, а модуль вектора ускорения силы тяжести и его направление вычисляются по формулам $g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}$; $\cos(\mathbf{g}, x) = \frac{g_x}{g} \dots$

Распределение силы тяжести внутри, на поверхности и вблизи Земли зависит от ее внутреннего строения.

Поскольку скалярные функции W и V зависят только от координат точки пространства массы M , можно для любой объемной массы задать поверхность, для точек которой потенциал будет постоянным – это изопотенциальная или уровенная поверхность

Физическая фигура Земли имеет сложный вид, а распределение плотностей масс неравномерное. Поэтому уровенные поверхности Земли представлены такими сложными поверхностями, что приходится их изучать последовательными приближениями, разделяя на классы по уровню сложности.

Уровенные поверхности не могут пересекаться или касаться друг друга. Каждой поверхности соответствует единственное значение потенциала $W = const = C$, а работа при перемещении единичной массы по этой поверхности равна нулю. Во всех точках уровенной поверхности потенциальная сила направлена по нормали к уровенной поверхности. Земля имеет нестациона-

нарное потенциальное поле, изменяющееся во времени. Это обусловлено притяжением ее другими планетами и Солнцем. Фигура Земли изменяется (приливы, дрейф континентов, движения земной поверхности, изменения уровней морей и океанов, движения полюсов, неравномерность вращения, сезонные явления и другие деформации) вызывают возмущение потенциального поля вследствие переноса масс с одной уровенной поверхности на другую и изменения их взаимного расположения.

В теоретических исследованиях целесообразно иметь уровенную поверхность, которая была бы внешней по отношению ко всем притягивающим массам и менее чувствительной к незначительным вариациям гравитационного поля Земли. Это поверхность геоида. Для научного и практического использования необходима более простая фигура – общеземной трехосный эллипсоид.

В геодезии сила тяжести определяется прямыми измерениями; таким образом, задача изучения фигуры планеты состоит в том, чтобы определить возмущающий потенциал на земной поверхности и над ней.

Ирландский математик Дж. Стокс в 1849 г. первым решил геодезическую краевую задачу при условии, что ускорение силы тяжести известно в любой точке поверхности геоида (рассматриваемой в данном случае как граничная поверхность). Однако, определить силу тяжести на всей земной поверхности очень нелегко, а измерять силу тяжести на поверхности геоида на суше вообще невозможно. Единственно возможное решение состоит в том, чтобы рассчитать ускорение силы тяжести для геоида, используя данные измерений на земной поверхности и вводя поправку за аномалию высоты. Этот метод требует также учета гравитационного воздействия масс земной коры, находящихся между топографической поверхностью и поверхностью геоида. В конце 1950-х годов советский геодезист М.С. Молоденский нашел решение, пригодное для любой произвольной поверхности. Эта поверхность может быть описана по гравиметрическим данным без знания внутреннего строения Земли.

Строение земной коры более или менее отчетливо выражается в аномалиях силы тяжести (гравитационных). Эти анома-

лии соответствуют разности между наблюдаемой силой тяжести и ее теоретическим значением в тех же точках земной поверхности, т. е. отражают различия в строении идеальной и реальной Земли. При этом гравитационные аномалии отличаются не только по величине, но и по направлению силы тяжести (вызывают отклонения отвеса от вертикали).

Поскольку определения силы тяжести производятся на поверхности Земли, не совпадающей, за исключением поверхности Мирового океана, с уровнем геоида, гравитационные аномалии обычно приводятся к поверхности геоида и выражаются в так называемых аномалиях Буге, вычисленных с поправками за высоту точки наблюдения и за притяжение промежуточного слоя.

Выделяют региональные и местные аномалии. Первые распространяются на десятки и сотни тысяч квадратных километров и отличаются большой интенсивностью (многие десятки и сотни миллигалов). На фоне региональных аномалий проявляются местные аномалии разного масштаба и характера, связанные с особенностями строения самых верхних горизонтов земной коры. Местные аномалии широко используются в поисково-разведочной практике (при поисках нефти, газа и других полезных ископаемых).

Гравитационное поле Земли неоднородно. В нем отчетливо выделяются следующие типы. Спокойная картина гравитационного поля просматривается на огромных пространствах поверхности материков со спокойным рельефом (платформы), которые характеризуются чередованием небольших положительных и отрицательных аномалий, охватывающих сравнительно незначительные по площади районы. Гравитационное поле горноскладчатых областей неоднородно и сложно. В океанах гравитационное поле спокойно и меняется плавнее, чем на материках.

Вычисленное значение силы тяжести называют "нормальным", а наблюдаемое – аномальным. Гравитационные аномалии на Земле, как правило, меньше 100 мГал, их среднеквадратическая вариация по Земле составляет величину около 20 мГал. Следовательно, гравитационное поле Земли достаточно гладкое. Для экстремальных условий (островные дуги, глубоководные впадины) гравитационные аномалии достигают величины

400 мГал, что в 12,5 раз меньше разницы в значениях силы тяжести на полюсе и экваторе и составляют всего 0,04 % от величины силы тяжести.

Ускорение силы тяжести измерено повсюду – и на материках, и на океанах. Полученные результаты противоречили здравому смыслу. Оказалось, что на одной и той же широте ускорение свободного падения в среднем почти одинаково и на океанах, и на материках, хотя, судя по различным данным, толщина континентальной земной коры (в среднем 35–40 км) значительно больше толщины океанической коры (около 5 км). Геодезические работы в Индии близ горного массива Гималаев показали, что координаты астрономических пунктов из-за отклонений отвесной линии отличаются от геодезических на 5,2", тогда как вычисленное отклонение, связанное с притяжением гор, составляет 27,9", т. е. притяжение отвеса получилось гораздо меньше, чем можно было ожидать.

О том, что ускорение свободного падения повсюду на Земле примерно одинаково, свидетельствует форма геоида и его почти совершенно гладкая поверхность. Если бы сравнительно высокая плотность материковых масс ничем не компенсировалась в районе океанов, то, во-первых, геоид имел бы более неровную, чем на самом деле, поверхность и, во-вторых, неровности соответствовали бы распределению океанов и материков. Значит, внутри Земли действует какой-то компенсационный механизм, создающий наблюдаемую картину.

Для объяснения этого явления английский геодезист Пратт (1854.) предположил, что возвышенные части земной коры оказываются приподнятыми благодаря своей малой плотности. Иными словами, если все породы разбить на блоки, то плотность этих блоков должна зависеть от их толщины: чем толще блок, тем меньше плотность. При этом вес всех блоков на некоторой поверхности, называемой поверхностью компенсации, один и тот же. Вся земная кора, таким образом, находится в равновесии. Эта гипотеза Пратта получила название изостатической.

Французский геодезист Эри (1855) представлял механизм компенсации несколько иначе. Отдельные части земной коры он уподоблял исполинским чурбакам одинаковой плотности, пла-

вающим в воде (верхней мантии). Чурбак, выступающий из воды больше, должен быть погружен на наибольшую глубину. Хейсканен и другие ученые (1958) пришли к выводу, что изостатическое равновесие земной коры в среднем на 63 % осуществляется по «Эри» и на 37 % «по Пратту».

Гравитационное поле Земли принято разделять на две части: нормальное гравитационное поле и остаточное аномальное поле. В физической геодезии оперируют в основном с аномальным гравитационным полем. Основное преимущество такого подхода состоит в том, что аномальное поле гораздо слабее действительного гравитационного поля Земли и поэтому его характеристики легче определить. Нормальное гравитационное поле характеризуется четырьмя параметрами: общей массой Земли; формой и размерами эллипсоида, наиболее близко соответствующего геоиду в глобальном масштабе; скоростью вращения Земли. Его определение вытекает из условия, что поверхность эллипсоида это уровенная поверхность в нормальном гравитационном поле, а поверхность геоида представляет собой уровенную поверхность в действительном гравитационном поле. При этом предполагается, что центр нормального эллипсоида (или референц-эллипсоида) совпадает с центром масс Земли. В любой точке разность высот геоида и референц-эллипсоида, называемая ондуляцией геоида, прямо пропорциональна возмущающему потенциалу. Таким образом, определение аномального гравитационного поля (путем гравиметрических измерений) позволяет определить положение поверхности геоида по отношению к эллипсоиду и отсюда – форму Земли.

Накопился достаточно большой материал для определения модели гравитационного поля Земли как планеты. По мере накопления новых данных производилась ревизия этих моделей. Настоящую революцию в определении гравитационного поля планеты произвели первые запуски искусственных спутников Земли.

Сейчас построено достаточно много моделей гравитационного поля Земли разной детальности и точности. Гравитационное поле Земли до 1957 г. было известно с точностью до третьего коэффициента в разложении гравитационного потенциала,

т. е. с точностью до сжатия Земли (1/298). Первые детальные модели гравитационного поля Земли, построенные по результатам наблюдений спутников с использованием дополнительной информации из высотомерных и наземных гравиметрических измерений, содержали около 150 коэффициентов в разложении гравитационного потенциала. Наиболее детальная из известных моделей, получившая шифр EGM-96 имеет 360 коэффициентов в разложении гравитационного потенциала.

Применение новых технологий наблюдения спутников сделало возможным реализовать дифференциальный метод определения гармоник геопотенциала и получить более детальную структуру гравитационного поля с разрешением 200–300 км. В проекте «CHAMP» (2000) впервые была применена методика «спутник-спутник» в режиме «высокий-низкий». Спутник имеет на борту GPS приемник и акселерометр, систему поддержания ориентации спутника и параметров орбиты, лазерные отражатели, сенсор ориентации и т. д. Информация, полученная с этого спутника, кардинально изменила подход к решению проблемы определения гравитационного поля. Было построено несколько моделей по разному набору измерительных данных. В результате «уровенная» поверхность Земли (геоид) определена с точностью 10 см и пространственным разрешением 350 км.

Другой успешный запуск спутников для определения временных изменений гравитационного поля был осуществлен в 2002 году. В проекте GRACE реализована методика «спутник-спутник» с использованием новейших технологий. В данной методике микроволновым К-частотным дальномером измеряются вариации расстояния между парой спутников на одной орбите с высокой точностью 1 микрометр в секунду. Эти вариации напрямую зависят от действующих на спутники аномалий гравитационного поля. Координаты и скорость движения этих спутников измеряется системой GPS.

В основе космического проекта GOCE (2009), разработанного в Европейском космическом агентстве заложен принцип градиентометрии, т. е. измерения градиентов гравитационного ускорения. Состояние гравитационного поля определяется с помощью орбитального аппарата GOCE (Gravity Field and Ocean

Circulation Explorer). На борту аппарата имеется три пары акселерометров, которые измеряют проекцию ускорения свободного падения на три перпендикулярные оси. Полученные данные служат для определения формы нашей планеты.

Используя данные спутника GOCE, составлена карта гравитационных аномалий Земли (рис. 9).

Перечисленные выше эксперименты открывают новые пути исследований гравитационного поля Земли и изучения ее внутреннего строения.

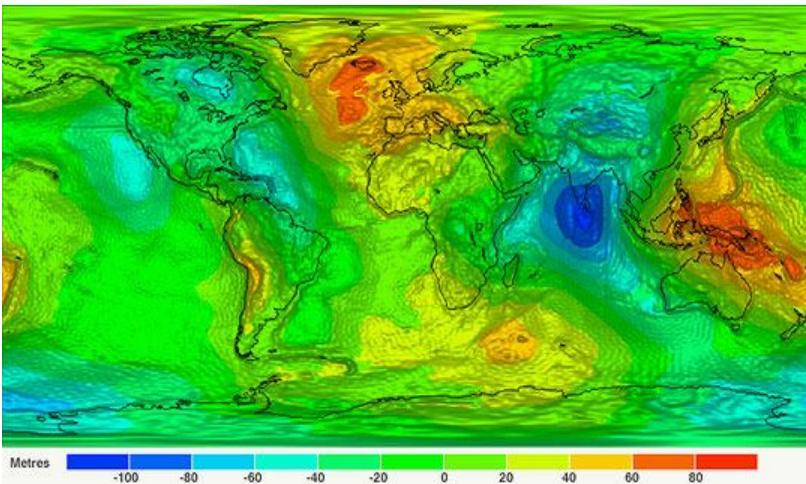


Рис. 9. Карта гравитационных аномалий Земли

1.5. Магнитное и электрическое поля Земли

Магнитное поле Земли может быть аппроксимировано дипольной моделью, изображенной на рис. 10. Из него видно, что линии магнитного поля ориентированы практически вертикально в центрах северного и южного полушариев, и практически горизонтальны на экваторе.

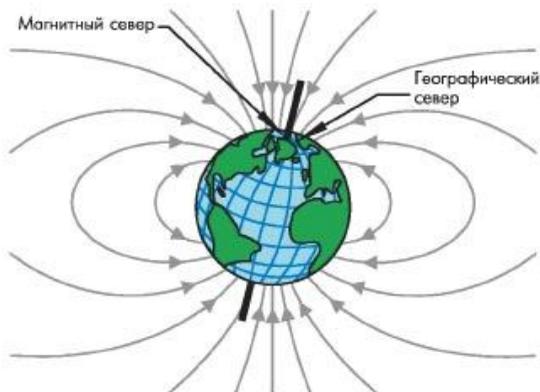


Рис. 10. Структура магнитного поля Земли и географический Север

Внешнее ядро Земли жидкое и металлическое. Металл, – проводящее ток, вещество, и если бы существовали в жидком ядре постоянные течения, то соответствующий электрический ток создавал бы магнитное поле. Благодаря вращению Земли, такие течения в ядре существуют. Земля в некотором приближении является магнитным диполем, т. е. своеобразным магнитом с двумя полюсами: южным и северным. Ось магнитного поля проходит под углом в $11,5^{\circ}$ к оси вращения планеты. Северный магнитный полюс медленно перемещается вместе с самой магнитной осью из-за переменности порождающих магнитное поле процессов. Кроме того, ось магнитного поля не проходит через геометрический центр вращения Земли, а сдвинута на 342 км в сторону, противоположную восточной оконечности Бразилии. Полярность магнитного поля Земли противоположна географической. Северный магнитный полюс расположен на юге, в Антарктиде, а Южный – на севере, в Канаде. Магнитное поле Земли несимметрично.

Дипольное магнитное поле Земли – это набор вложенных друг в друга магнитных оболочек. Его структура напоминает луковичу или кочан капусты. Магнитную оболочку можно определить как замкнутую поверхность, сотканную из магнитных силовых линий. Чем ближе оболочка к центру диполя, тем больше напряженность магнитного поля. Реальное магнитное поле Земли отличается от ее теоретического магнитного поля. Это вызвано не толь-

ко местными аномалиями, но и взаимодействием с магнитными полями Солнца, планет и потоков заряженных частиц, испускаемых в изобилии Солнцем (солнечный ветер). Такие потоки порождают сильное магнитное поле, которое и взаимодействует с полем Земли, сильно деформируя его, как это представлено на рис. 11.

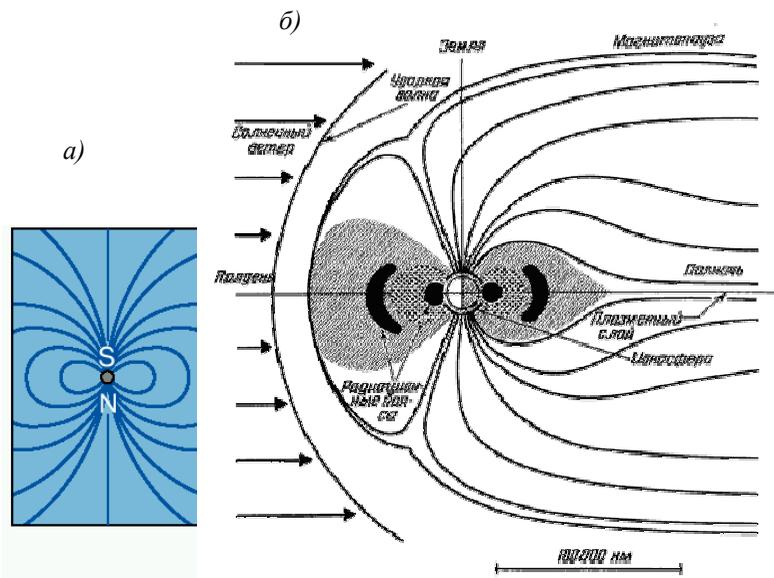


Рис. 11. Магнитное поле Земли: а) дипольное магнитное поле; б) магнитное поле Земли, трансформированное потоком солнечного ветра

Магнитосфера – область околоземного космического пространства, контролируемая магнитным полем Земли. Магнитосфера формируется в результате взаимодействия солнечного ветра с плазмой верхних слоев атмосферы и магнитным полем Земли.

Хвост магнитосферы образован силовыми линиями магнитного поля Земли, выходящими из полярных областей и вытянутых под действием солнечного ветра на сотни земных радиусов от Солнца в ночную сторону Земли. В итоге плазма солнечного ветра и солнечных корпускулярных потоков как бы обтекают земную магнитосферу, придавая ей своеобразную хвостатую форму.

Благодаря своему магнитному полю, Земля удерживает в так называемых радиационных поясах захваченные частицы

солнечного ветра, вредные для всего живого, не позволяя им проходить в атмосферу Земли и тем более к поверхности.

Наклон и смещение оси диполя по отношению к оси вращения, а также величина магнитного момента определяют лишь общую картину магнитного поля Земли. На малых расстояниях от Земли поле несколько искажается под влиянием магнитных аномалий: Бразильской, Южно-атлантической, Северной и др. На расстоянии же более 6–7 радиусов Земли оно существенно искажено солнечным ветром (магнитным полем, замороженным в плазму солнечного ветра).

Магнитные полюса Земли, в отличие от географических (Южного и Северного полюса), не имеют постоянных координат, а медленно перемещаются.

Земля обладает и собственным электрическим зарядом и электрическим полем. В различных сферах планеты и в недрах, и в Океане, и в атмосфере давно зафиксированы электрические круговые токи.

Планета Земля – уникальная природная электрическая машина, которая и обеспечивает планете ее непрерывное вращение и протекание всех природных явлений. По конструкции и режиму работы она представляет из себя совмещенный природный электрический индуктивно-емкостной мотор – генератор. Солнечный ветер является ее первичным источником энергии, а динамика солнечной активности существенно влияет на ее работу. Осевое вращение планеты обусловлено сразу двумя электромеханическими моментами – электромагнитным и электростатическим.

Электрическое поле над поверхностью Земли в среднем имеет напряженность около 100 В/м и направлено вертикально вниз – это так называемое «поле ясной погоды», но это поле испытывает значительные (как периодические, так и нерегулярные) вариации.

В природе электрическое поле и магнитное известны как две составляющие электромагнитного поля. Изменение магнитного поля Земли во времени связано с изменением суточного вращения планеты (замедление вращения) и с последующим изменением направления вращения планеты. Электрическое поле Земли – это естественное электрическое поле Земли как планеты, которое наблюдается в твёрдом теле Земли, в морях, в атмосфере и магнитосфере. Оно обусловлено сложным комплексом геофизических яв-

лений. Распределение потенциала поля несёт в себе определённую информацию о строении Земли, о процессах, протекающих в нижних слоях атмосферы, в ионосфере, магнитосфере, а также в ближнем межпланетном пространстве и на Солнце.

Изучение изменений магнитного поля (магнитометрические исследования) и электрического поля (мониторинг электрического сопротивления земной коры) служат для изучения движений земной коры, поиска предвестников землетрясений.

1.6. Землетрясения

Землетрясение – одно из самых древних катастрофических явлений на Земле. Оно возникает при внезапном освобождении энергии, которая долгое время накапливается в результате тектонических процессов в относительно локализованных областях земной коры и верхней мантии. При этом происходит разрыв (разлом) сплошности горных пород, иногда на многие десятки километров. Область, где возникает процесс разрушения, называется очагом, гипоцентром или гипоцентральной областью. Проекция очага или его области на земную поверхность называется эпицентром или эпицентральной областью. Зона сильных колебаний и значительных разрушений на поверхности при землетрясении называется плейстосейстовой областью (рис. 12).

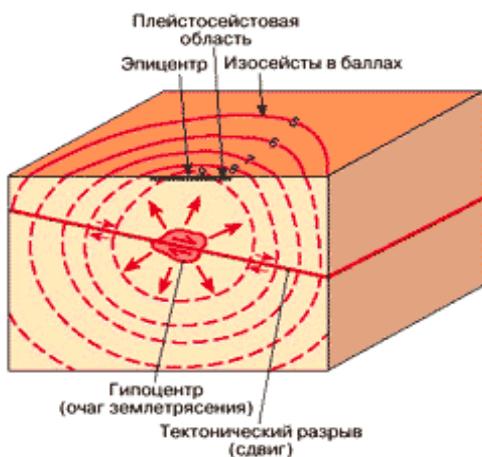


Рис. 12. Схема строения очага землетрясения

По глубине расположения гипоцентров землетрясения делятся на три типа:

- поверхностные (0–70 км);
- промежуточные (70–300 км);
- глубокие (300–700 км).

Очаг землетрясения характеризуется интенсивностью сейсмического эффекта, выражаемого в баллах и магнитуде.

Для измерения силы землетрясения используются две шкалы: одна для измерения интенсивности и другая для измерения магнитуды.

Интенсивность является качественной характеристикой землетрясения и указывает на характер и масштаб воздействия землетрясений на поверхность земли, на людей, животных, а также на естественные и искусственные сооружения в районе землетрясения. В мире используется несколько шкал интенсивности: в США – Модифицированная шкала Меркалли (ММ), которая имеет 12 уровней интенсивности (баллов); в Европе – Европейская макросейсмическая шкала (EMS), в Японии – шкала Шиндо (Shindo). 12-балльная шкала Медведева–Шпонхойера–Карника была разработана в 1964 году и получила широкое распространение в Европе и СССР. MSK-64 лежит в основе СНиП РК 2.03-30-2006 "Строительство в сейсмических районах" и продолжает использоваться в Казахстане.

Таблица 7

Шкала интенсивности землетрясения

Балл	Сила землетрясения	Краткая характеристика
1	Не ощущается.	Отмечается только сейсмическими приборами
2	Очень слабые толчки	Отмечается сейсмическими приборами. Ощущается только отдельными людьми, находящимися в состоянии полного покоя в верхних этажах зданий, и очень чуткими домашними животными
3	Слабое	Ощущается только внутри некоторых зданий, как сотрясение от грузовика

Продолжение таблицы 7

Балл	Сила землетрясения	Краткая характеристика
4	Умеренное	Распознаётся по лёгкому дребезжанию и колебанию предметов, посуды и оконных стёкол, скрипу дверей и стен. Внутри здания сотрясение ощущает большинство людей
5	Довольно сильное	Под открытым небом ощущается многими, внутри домов – всеми. Общее сотрясение здания, колебание мебели. Маятники часов останавливаются. Трещины в оконных стёклах и штукатурке. Пробуждение спящих. Ощущается людьми и вне зданий, качаются тонкие ветки деревьев. Хлопают двери
6	Сильное	Ощущается всеми. Многие в испуге выбегают на улицу. Картины падают со стен. Отдельные куски штукатурки откалываются
7	Очень сильное	Повреждения (трещины) в стенах каменных домов. Антисейсмические, а также деревянные и плетневые постройки остаются невредимыми
8	Разрушительное	Трещины на крутых склонах и на сырой почве. Памятники сдвигаются с места или опрокидываются. Дома сильно повреждаются
9	Опустошительное	Сильное повреждение и разрушение каменных домов. Старые деревянные дома кривятся
10	Уничтожающее	Трещины в почве иногда до метра шириной. Оползни и обвалы со склонов. Разрушение каменных построек. Искривление железнодорожных рельсов
11	Катастрофа	Широкие трещины в поверхностных слоях земли. Многочисленные оползни и обвалы. Каменные дома почти полностью разрушаются. Сильное искривление и выпучивание железнодорожных рельсов
12	Сильная катастрофа	Изменения в почве достигают огромных размеров. Многочисленные трещины, обвалы, оползни. Возникновение водопадов, подпруд на озёрах, отклонение течения рек. Ни одно сооружение не выдерживает

Магнитуда землетрясения – это величина, пропорциональная энергии, выделяемой в очаге землетрясения. Она определяется с помощью прибора, называемого сейсмографом. Показания прибора (амплитуда и период сейсмических волн) указывают на количество энергии упругой деформации, выделяемой в процессе землетрясения. Чем больше амплитуда волны, тем сильнее землетрясение. Наиболее популярной шкалой для оценки энергии землетрясений является локальная шкала магнитуд Рихтера. По этой шкале возрастанию магнитуды на единицу соответствует 32-кратное увеличение освобожденной сейсмической энергии. Землетрясение с магнитудой 2 едва ощутимо, тогда как, магнитуда 7 отвечает нижней границе разрушительных землетрясений, охватывающих большие территории.

Размещение землетрясений на земном шаре носит вполне закономерный характер и в целом хорошо объясняется теорией тектоники литосферных плит. Наибольшее количество землетрясений связано с конвергентными и дивергентными границами плит, т. е. с такими зонами, где плиты либо сталкиваются друг с другом, либо расходятся и наращиваются за счет образования новой океанической коры (рис. 13).

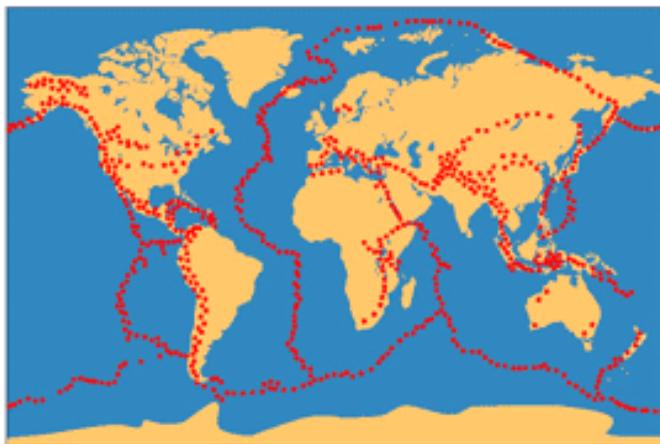


Рис. 13. Распространение поясов сейсмичности на земном шаре

К высокосейсмичным районам относятся активные окраины Тихого океана, Альпийский горно-складчатый пояс. В середине океанов сейсмические события концентрируются вдоль очень узких полосок, которые совпадают с местоположением срединно-океанических хребтов. Наиболее важные из срединно-океанических хребтов – Срединно-Атлантический и Центрально-Индийский.

Если землетрясение происходит в океане, над его эпицентром при внезапном вертикальном смещении дна во всей массе воды возникают своеобразные подводные волны,двигающиеся со скоростью до 800 км/ч во все стороны от эпицентра – цунами.

Среди потенциально опасных стихийных бедствий для Казахстана, по данным Агентства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан, землетрясения занимают первое место. Этой опасности подвержено около 6 миллионов казахстанцев и около 450 тысяч квадратных километров территории республики. В сейсмоопасной зоне расположено 27 городов и более 400 населенных пунктов. На этой территории находится около 40 % промышленного потенциала республики.

Земная кора Тянь-Шаня, у северного подножия которого находится город Алматы, является одной из наиболее сейсмоопасной во всей Центральной Азии. За сто с небольшим лет здесь произошло около десяти разрушительных землетрясений, два из которых вошли в разряд мировых сейсмических катастроф (Кеминское – 1911 г., Чиликское – 1889 г.) [3].

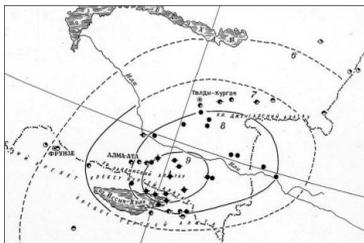


Рис. 14. Кеминское землетрясение:
а) очаг землетрясения; б) последствия землетрясения

С конца семидесятых годов прошлого века на территории РК произошло несколько землетрясений с интенсивностью в эпицентре 7–8 баллов по шкале МСК-64 (табл. 8).

Прогноз землетрясений – наиболее важная проблема, которой занимаются ученые во многих странах мира. Под прогнозом землетрясения обычно подразумевают предсказание энергии, места, времени и фокального механизма его возникновения.

Прогнозирование землетрясений включает в себя как выявление их предвестников, так и сейсмическое районирование, т. е. выделение областей, в которых можно ожидать землетрясения определенной магнитуды или бальности.

Таблица 8

Землетрясения на территории РК

Наименование землетрясения	Интенсивность в эпицентре
Жаланаш-Тюпское, 1978	8
Баканасское, 1979	7
Зайсанское, 1990	8
Байсурунское, 1990	8
Текелийское, 1993	7
Луговское, 2003	7
Сюмбинское, 2003	7
Чуйское, Алтай, 2003	8
Шалкарское, 2008	7
Текелийское, 2009	7

Предсказание землетрясений состоит из долгосрочного прогноза на десятки лет, среднесрочного прогноза на несколько лет, краткосрочного на несколько недель или первые месяцы и объявление непосредственной сейсмической тревоги.

Основными предвестниками землетрясений можно считать следующее.

Сейсмичность. Положение и число землетрясений различной магнитуды могут служить важным индикатором приближающегося сильного землетрясения. Например, сильное землетрясение часто предваряется роем слабых толчков. Выявление и

подсчет землетрясений требует большого числа сейсмографов и соответствующих устройств для обработки данных.

Движения земной коры. Геодезические мониторинговые наблюдения в линейно-угловых и спутниковых сетях могут выявить горизонтальные и вертикальные деформации поверхности Земли и дать им количественное определение.

Опускание и поднятие участков земной коры. Вертикальные движения поверхности Земли можно измерить с помощью точных нивелировок на суше или мареографов в море. Поскольку мареографы устанавливаются на грунте, а записывают положение уровня моря, они выявляют длительные изменения среднего уровня воды, которые можно интерпретировать как поднятия и опускания самой суши.

Наклоны земной поверхности. Для измерения угла наклона земной поверхности был сконструирован прибор, называемый наклономером. Наклономеры обычно устанавливаются около разломов на глубине 1-2 м ниже поверхности земли и их измерения указывают на выразительные изменения наклонов незадолго до возникновения слабых землетрясений.

Деформации. Для измерения деформаций горных пород бурят скважины и устанавливают в них деформографы, фиксирующие величину относительного смещения двух точек. После этого деформация определяется путем деления относительного смещения точек на расстояние между ними. Эти приборы настолько чувствительны, что измеряют деформации в земной поверхности вследствие земных приливов, вызванных гравитационным притяжением Луны и Солнца. Земные приливы, представляющие собой движение масс земной коры, похожее на морские приливы, вызывают изменения высоты суши с амплитудой до 20 см. Крипометры подобны деформографам и используются для измерения крипа, или медленного относительного движения крыльев разлома.

Скорости сейсмических волн. Скорость сейсмических волн зависит от напряженного состояния горных пород, через которые волны распространяются. Изменение скорости продольных волн – сначала ее понижение (до 10 %), а затем, перед землетрясением, – возврат к нормальному значению, объясняется изменением свойств горных пород при накоплении напряжений.

Геомагнетизм. Земное магнитное поле может испытывать локальные изменения из-за деформации горных пород и движения земной коры. С целью измерения малых вариаций магнитного поля были разработаны специальные магнитометры. Такие изменения наблюдались перед землетрясениями в большинстве районов, где были установлены магнитометры.

Земное электричество. Изменения электросопротивления горных пород могут быть связаны с землетрясением. Измерения проводятся с помощью электродов, помещенных в почву на расстоянии нескольких километров друг от друга. При этом измеряется электрическое сопротивление толщи земли между ними. Опыты, проведенные сейсмологами Геологической службы США, обнаружили некоторую корреляцию этого параметра со слабыми землетрясениями.

Содержание радона в подземных водах. Радон – это радиоактивный газ, присутствующий в грунтовых водах и в воде скважин. Он постоянно выделяется из Земли в атмосферу. Изменения содержания радона перед землетрясением впервые были замечены в Советском Союзе, где десятилетнее возрастание количества радона, растворенного в воде глубоких скважин, сменилось резким его падением перед Ташкентским землетрясением 1966 г. (магнитуда 5.3).

Уровень воды в колодцах и скважинах. Уровень грунтовых вод перед землетрясениями часто повышается или понижается, как это было в Хайчэне (Китай), по-видимому, 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 она находится далеко от эпицентра. Уровень воды в скважинах, находящихся вблизи эпицентра, часто испытывает стабильные изменения: в одних скважинах он становится выше, в других – ниже.

Изменение температурного режима приповерхностных земных слоев. Инфракрасная съемка с космической орбиты позволяет “рассмотреть” своеобразное тепловое покрывало нашей планеты – невидимый глазу тонкий слой в сантиметры толщиной, создаваемый вблизи земной поверхности ее тепловым излучением. Сейчас накоплено много факторов, которые говорят

об изменении температурного режима приповерхностных земных слоев в периоды сейсмической активизации.

Изменение химического состава вод и газов. Процесс подготовки землетрясения сопровождается формированием в подземных водах, территориально связанных с эпицентральной зоной землетрясения, газовой-химической аномалии, проявляющейся в широкой гамме химических показателей. Они помогают получить важную информацию о процессах, протекающих очень глубоко под землей.

Поведение животных. В течение столетий многократно сообщалось о необычайном поведении животных перед землетрясением, хотя до последнего времени сообщения об этом всегда появлялись после землетрясения, а не до него. Нельзя сказать, действительно ли описанное поведение было связано с землетрясением, или же это было просто обычное явление, которое каждый день случается где-нибудь в окрестностях; к тому же в сообщениях упоминаются как те события, которые вроде бы случились за несколько минут до землетрясения, так и те, что произошли за несколько дней.

В 2008 г. в рамках Международной программы – Соглашения о сотрудничестве в области прогнозирования землетрясений ICSEP (International Cooperation for Earthquake Prediction) создана Глобальная сеть прогнозирования землетрясений (GNFE). Международные соглашения о сотрудничестве с GNFE были подписаны и с Казахстаном (НПК Прогноз, МЧС, Казахстан).

Для прогнозирования землетрясений используются станции типа ATROPATENA-AZ2 (рис. 15).

В последние годы в исследованиях по прогнозу землетрясений стали широко применяться космические средства наблюдения. Новые спутниковые технологии позволяют отслеживать деформации земной поверхности, изменения температуры почв при выбросах глубинных флюидов, изменения в свойствах ионосферы, связанные с подготовкой и реализацией сильных землетрясений.



Рис.15. Станция для прогноза землетрясений ATROPATENA-AZ2

В работах по прогнозу землетрясений широко используются высокоточные системы глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС, а также появившиеся чуть позже спутниковые радары с синтетической апертурой InSAR. GPS позволяет с точностью до миллиметров отслеживать положения точек земной поверхности, где установлены стационарные приемники, и оценивать скорости их движения. Технология InSAR дает площадные изображения смещений земной поверхности за интервалы времени между последовательными обзорами территории.

1.7. Тектоника литосферных плит

К геодинамическим задачам геодезии относятся движения литосферных плит и земной коры. О больших горизонтальных перемещениях континентов, сопровождающихся деформациями, говорил еще М.В. Ломоносов, позднее на них указывали Верштейн (1880), Ф. Сакко (1895 г.), Е.В. Быханов (1895), Ф. Тэйлор (1910). Особенно подробно разработал эту теорию А. Вегенер (1912, 1920).

В 1912 г. немецкий геофизик А.Вегенер (рис. 16, а) предположил, что когда-то вся нынешняя 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, сначала на Лавразию и Гондвану, а затем на более мелкие блоки (рис. 16, б). 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 [4].

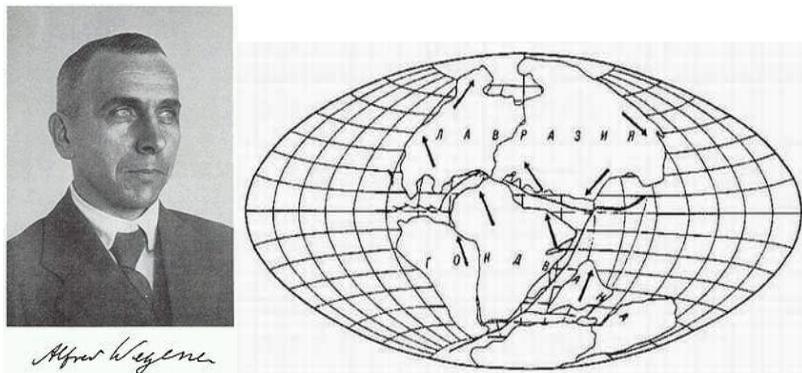


Рис.16. Теория литосферных плит:
а) А. Вегенер; б) раскол Пангеи

Возрождение идеи о движениях в твёрдой оболочке Земли («мобилизм») произошло в 1960-х годах, когда в результате исследований рельефа и геологии океанического дна были получены данные, свидетельствующие о процессах расширения (спрединга) океанической коры и пододвигания одних частей коры под другие (субдукции). Объединение этих представлений со старой теорией дрейфа материков породило современную теорию тектоники плит, которая вскоре стала общепринятой концепцией в науках о Земле. Окончательное подтверждение теории континентального дрейфа ученые получили, изучая магнетизм океанического дна. Они обнаружили, что вблизи подводных вулканов в срединно-океанических хребтах кора всегда молодая, а вдоль побережья континентов – древняя. По мере удаления от хребта в обе стороны возраст коры увеличивается. Ученые установили, что возраст океанической коры нигде не превышает 180 млн. лет.

Основные положения тектоники плит можно сформулировать следующим образом:

– верхняя часть твёрдой Земли делится на хрупкую литосферу и пластичную астеносферу. Конвекция в астеносфере – главная причина движения плит;

– современная литосфера делится на 8 крупных плит, десятки средних плит и множество мелких. Мелкие плиты расположены в поясах между крупными плитами. Сейсмическая, тектоническая и магматическая активность сосредоточена на границах плит;

– литосферные плиты в первом приближении описываются как твёрдые тела, и их движение подчиняется теореме вращения Эйлера;

– существует три основных типа относительных перемещений плит:

1) расхождение (дивергенция), выражено рифтингом и спредингом;

2) схождение (конвергенция) выраженное субдукцией и коллизией;

3) сдвиговые перемещения по трансформным геологическим разломам;

– спрединг в океанах компенсируется субдукцией и коллизией по их периферии, причём радиус и объём Земли постоянны с точностью до термического сжатия планеты (в любом случае средняя температура недр Земли медленно, в течение миллиардов лет, уменьшается). Постоянство размеров Земли является гипотетическим;

– перемещение литосферных плит вызвано их увлечением конвективными течениями в астеносфере;

– существует два принципиально разных вида земной коры – кора континентальная (более древняя) и кора океаническая (не старше 200 млн. лет). Некоторые литосферные плиты сложены исключительно океанической корой (пример – крупнейшая тихоокеанская плита), другие состоят из блока континентальной коры, впаянного в кору океаническую.

– Более 90 % поверхности Земли в современную эпоху покрыто 8 крупнейшими литосферными плитами: Австралийская

плита, Антарктическая плита, Африканская плита, Евразийская плита, Индостанская плита, Тихоокеанская плита, Северо-Американская плита, Южно-Американская плита (рис. 17).

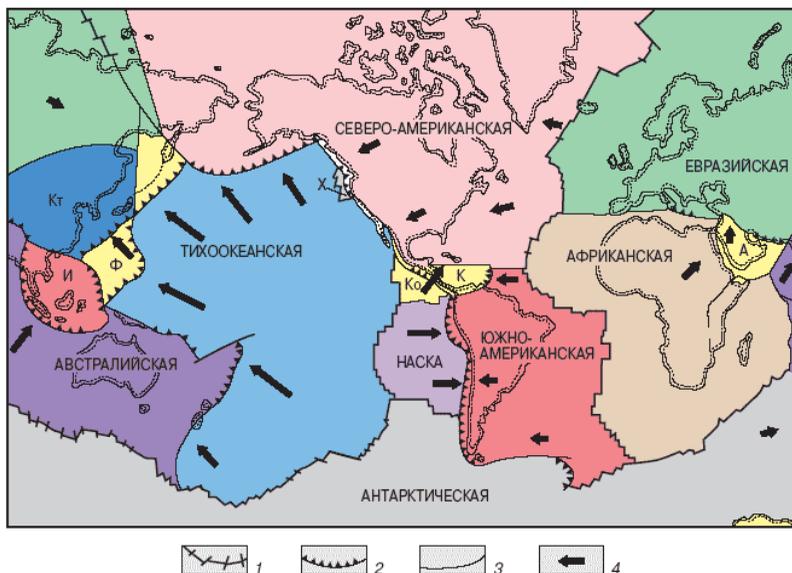


Рис. 17. Литосферные плиты Земли:

1 – дивергентные границы плит (оси спрединга), 2 – конвергентные границы (зоны субдукции и коллизии), 3 – трансформные разломы и прочие границы, 4 – векторы „абсолютных“ движений литосферных плит

Типы движений литосферных плит приведены в табл. 9.

Сейчас тектоника плит подтверждена прямыми измерениями скорости плит методом длиннобазисной радиоинтерферометрии, использующей излучения от далёких квазаров, и измерениями с помощью спутниковых навигационных систем GPS. Результаты многолетних исследований полностью подтвердили основные положения теории тектоники плит.

Использование глобальной системы позиционирования (GPS) позволяет получать детальную информацию о современных движениях в обширных регионах.

Таблица 9

Типы движений литосферных плит

Тип движения литосферных плит	Схема движения	Процессы, происходящие в результате движения плит	Примеры
Столкновение двух океанических плит		Островные вулканические дуги, океанические желоба	Курильские острова, Камчатский жёлоб
Плиты расходятся в противоположные стороны		Образуются разломы (рифты). Спрединг сопровождается вулканизмом, землетрясениями.	Красное море, Байкал, Мёртвое море, Средне-Атлантический хребет
Субдукция, или поддвижение, «подныривание» одной плиты под другую		Океанические желоба, складчатые горы. Субдукция сопровождается вулканизмом, землетрясениями.	Тихоокеанское побережье Южной Америки и Евразии
Коллизия, или столкновение двух континентальных плит		Образование складчатых гор	Гималаи, Альпы

Так GPS станции, расположенные на Аравийской плите показали, что она движется со скоростью 18 ± 2 мм/год в направлении север – северо–запад (азимут $25^\circ \pm 5^\circ$) относительно Евразийской плиты. Станции в Египте показали движение Африканской плиты на север со скоростью $5-6 \pm 2$ мм/год. Восточная Турция характеризуется распределенными деформациями, в то время как Центральная Турция движется практически как единое целое на запад с вращением против часовой стрелки. Анатолийская плита отделяется от Евразии правосторонним Североанатолийским разломом. Центральная и южная части Эгейского моря движутся на юго-запад со скоростью 30 ± 1 мм/год относительно Евразии.

Исключение составляют станции в юго-восточной части Эгейского моря, которые показывают увеличение скорости движения: скорость их движения на 10 ± 1 мм/год превосходит скорость движения станций в остальных районах Эгейского моря. На рис.18 показаны скорости горизонтальных перемещений в северной Турции и положение основных активных разломов.

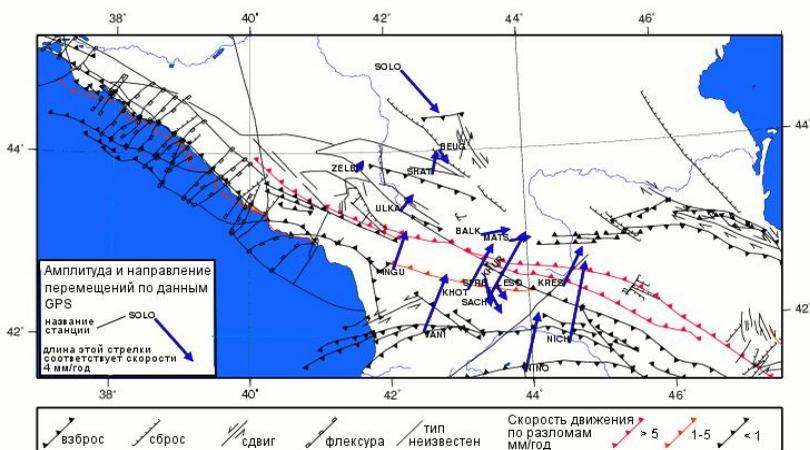


Рис. 18. Скорости горизонтальных перемещений в северной Турции и на Большом и Малом Кавказе

Основой применения GPS для изучения глобальных и региональных деформационных процессов является Международная геодинамическая сеть (IGS) базовых пунктов с постоянной регистрацией спутниковых сигналов, которые передаются в центры сбора, анализа и обработки данных. На рис. 19 представлены направление и скорость современных перемещений литосферных плит по данным космических наблюдений с помощью аппаратуры GPS, определенных с началом отчета в системе координат ITRF2000.

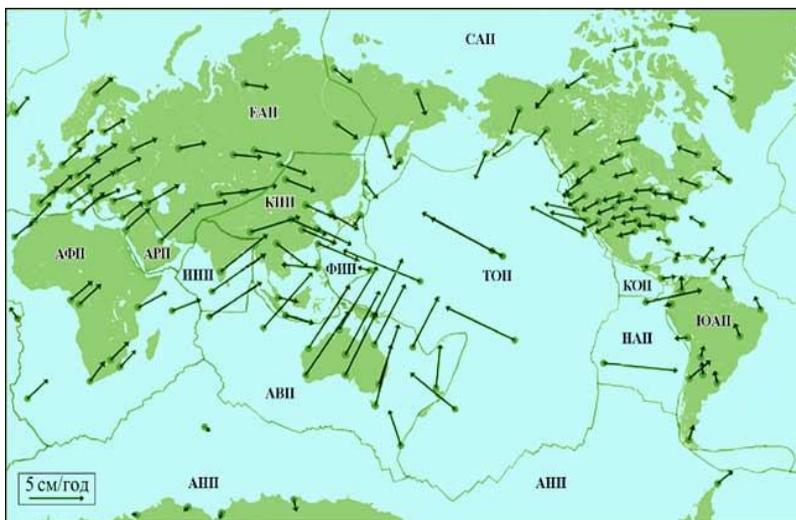


Рис. 19. Карта движения литосферных плит по данным GPS-наблюдений

2. ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ГЕОДЕЗИИ

2.1. Классификация геодинимических явлений

В геодезическом аспекте задачи геодинимики определяются кинематической геодезией, изучающей вопросы изменений во времени пространственного положения пунктов земной поверхности и элементов гравитационного поля Земли, и динамической геодезией, исследующей силы, вызывающие эти изменения.

Геодинимические явления по обхвату территории можно рассматривать как:

1 планетарные (глобальные). Глобальные процессы относятся ко всей Земле в целом, которая при их интерпретации заменяется некоторой идеальной однородной моделью. К ним относятся:

– изменения фигуры и внешнего гравитационного поля Земли во времени;

– изменение положения центра масс и осей инерции Земли;

– движение полюсов Земли;

– неравномерность вращения Земли;

2 крупномасштабные явления – это явления, имеющие масштабы континентов и океанов или значительных их частей.

К крупномасштабным геодинимическим явлениям относятся:

– движение литосферных плит;

– динамические изменения поверхности морей и океанов;

– крупномасштабные вариации геопотенциала во времени;

3 региональные геодинимические явления охватывают области протяженностью 102 – 103 км. К ним относятся региональные изменения положений точек земной поверхности и вариации величины и направления силы тяжести.

4 локальные явления относятся к областям протяженностью менее 102 км. Они включают в себя локальные движения земной коры и локальные изменения силы тяжести.

Динамика Земли, изменения ее фигуры и гравитационного поля во времени являются основным предметом, изучаемым в современной геодезии. При этом должно приниматься во внимание главное требование современных геодинимических 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, геофизические и другие работы в планетарном, континентальном и региональном масштабах.

2.2. Исследование глобальных и крупномасштабных геодинамических явлений

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, гравиметрические, спутниковые, радиоинтерферометрические, лазерные наблюдения, надежно определяющие фигуру и внешнее гравитационное поле Земли на каждую эпоху. Появилась практическая необходимость в создании планетарной земной системы отсчета, 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.

Эталонной международной земной системой отсчета в настоящее время является сеть ITRF (International Terrestrial Reference Frame). При построении сети использовались спутниковые лазерные наблюдения, радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой, спутниковые доплеровские наблюдения. При ее создании (1988) ITRF соответствовала следующим требованиям:

- система является геоцентрической с началом в центре масс Земли, включая океан и атмосферу;
- ориентация системы согласуется с параметрами ориентирования Земли Earth Orientation Parameter (EOP) на эпоху 1984,0;

– используемая в системе модель скоростей станций имеет нулевые величины остаточного вращения по отношению к земной коре;

– масштаб соответствует общеземной системе координат.

Пункты сети предназначены для установления положения и начала геоцентрической координатной системы, решения задач обеспечения точного мониторинга вращения Земли, движения полюсов и центра масс Земли с помощью современных методов космической геодезии. Для контроля за состоянием исходной глобальной координатной системы и проведения в случае необходимости ее корректировки создана Международная GPS – сеть для геодинамики (IGS).

Измерения на станциях этой сети используются для определения общей земной системы отсчета (ITRF), мониторинга движения литосферных плит, изучения вращения Земли и многих других задач. Помимо передачи в открытый доступ данных об измерениях на базовых станциях сети и их координат на определенную эпоху, служба IGS публикует информацию о точных эфемеридах спутников GPS и ГЛОНАСС, определенных по результатам обработки измерений станций сети, движении полюсов и т. д. [3].

Современная 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.

Геодинамические исследования гравитационного поля Земли во внешнем пространстве выполняются с использованием радиолокационных альтиметров, размещаемых на борту орбитальных спутников. В спутниковой альтиметрии расстояние от спутника до поверхности океана определяется с помощью электронных устройств, измеряющих время, за которое радиоволны

проходят это расстояние и обратный путь до бортового приемного устройства после отражения от поверхности океана. Скорость распространения сигнала, умноженная на половину полученного временного отрезка, дает искомое значение высоты. Уровень поверхности океана (приблизительно соответствующий поверхности геоида) относительно центра Земли или относительно поверхности некоего эллипсоида рассчитывается как разность между высотой орбиты спутника (которая постоянно определяется расположенными вокруг земного шара станциями слежения) и значениями измеренной высоты полета спутника над поверхностью океана.

Применение новых технологий наблюдения спутников сделало возможным реализовать дифференциальный метод определения гармоник геопотенциала и получить более детальную структуру гравитационного поля с разрешением 200–300 км. В проекте «ШАМП» (2000) впервые была применена методика «спутник-спутник» в режиме «высокий-низкий». В результате «уровенная» поверхность Земли (геоид) определена с точностью 10 см и пространственным разрешением 350 км.

В проекте «ГОСЕ» (Европейское космическое агентство), направленном на изучение тонкой структуры гравитационного поля Земли, заложен принцип градиентометрии, т. е. измерения градиентов гравитационного ускорения. Такая технология позволит построить модель гравитационного поля с разрешением 1 градус, 1-сантиметровой точностью определения геоида и с ошибкой 1 мГал в аномалиях силы тяжести.

Динамика Земли проявляется в движениях земного полюса и неравномерностях ее вращения. 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 (рис. 20).

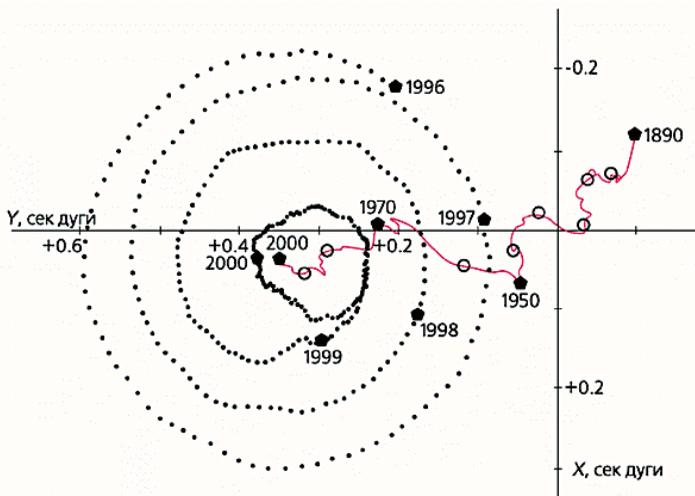


Рис. 20. Траектория движения Северного географического полюса в 1996–2000 гг. (<http://hpiers.obspm.fr/eoppc/eop/eop/eopc04/eopc04-xy.gif>)

Весьма важной задачей, решаемой в настоящее время исключительно средствами космической геодезии, является определение и мониторинг коротко периодических вариаций скорости вращения Земли и ее ориентации в пространстве, поскольку эти параметры определяют систему Всемирного времени и необходимы для связи инерциальной (небесной) и геоцентрической (земной) систем координат. Современная Международная служба вращения Земли определяет и регулярно публикует данные о параметрах ориентации Земли с точностью 1 см в положении полюса и около 0,3 миллисекунд по времени, что равноценно 1,4 см на экваторе. При этом относительные координаты наземных пунктов и длины базисов на расстояниях до нескольких сотен или тысяч км определяются с ошибками 1–5 мм по горизонтали и менее 1,0 см по вертикали.

По результатам ежегодных переопределений координат станций глобальных сетей наблюдений ИСЗ показано, что положение центра масс Земли, которое принимается за исходное начало системы координат, испытывает периодические колебания с небольшими амплитудами (3–10 мм) и имеет вековое смещение порядка 1,5–2,0 мм (рис. 21).

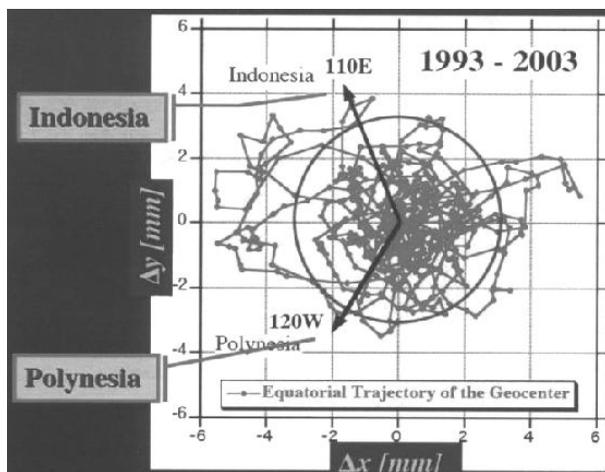


Рис. 21. Экваториальная траектория движения геоцентра по результатам уравнивания сети *ITRF* с 1993 по 2003 годы

Для высокоточного определения скорости вращения Земли используется радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ). Радиоинтерферометр состоит из двух радиотелескопов, разнесенных на сотни или тысячи километров, и наблюдающих один и тот же квазар – внегалактический источник шумового радиоизлучения (рис. 22).

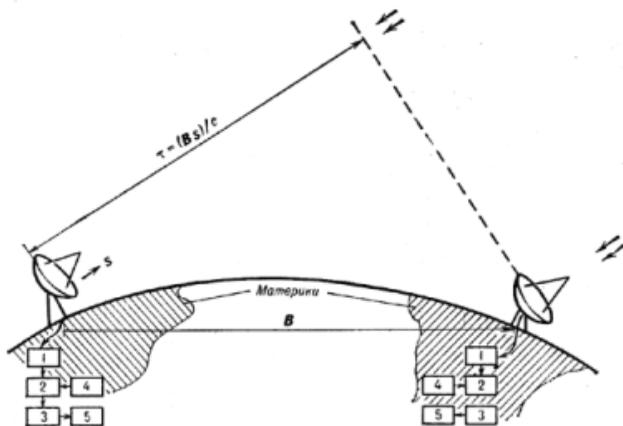


Рис. 22. Радиоинтерферометр со сверх длинной базой:

1 – усилитель высокой частоты, 2 – смеситель, 3 – усилитель видеочастот, 4 – атомный стандарт частоты, 5 – магнитофон

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 также 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.

Из сетей РСДБ формируется глобальная геодезическая сеть – система опорных пунктов с известными координатами. Поскольку метод РСДБ дает разности координат, необходимо иметь абсолютные координаты хотя бы одного пункта сети. Для этого обычно используют лазерную локацию искусственных спутников (SLR) Земли и Луны (LLR).

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 (угловой отражатель) – на поверхности Луны или ИСЗ.

На рис. 23 приведена типовая структурная схема лазерной локации для астрономических наблюдений спутников, работающая в режиме измерения дальности объекта.

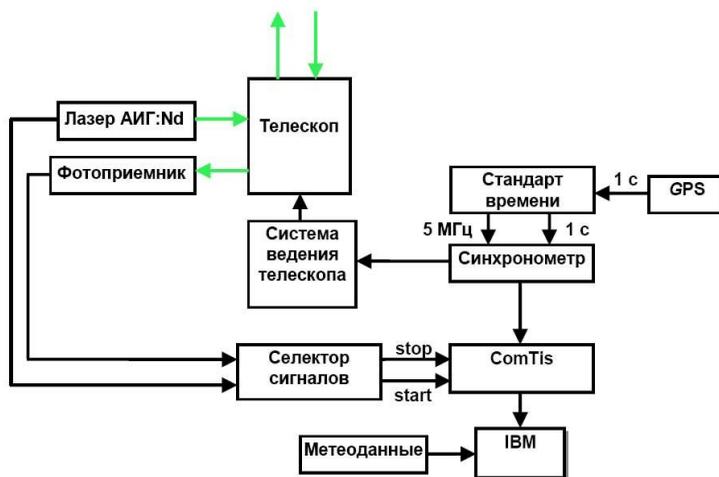


Рис. 23. Схема лазерной локации

Принцип работы лазерной локации в соответствии со структурной схемой, заключается в следующем. Лазер излучает сигнал в телескоп (рис. 24), направленный на отражатель, при этом точно фиксируется время, когда сигнал был излучён. Отражённый от отражателя свет в течение примерно одной секунды возвращается в телескоп.



Рис. 24. Телескоп ТПЛ-1М

Современные лазерные наблюдения имеют высокую точность. Пункты наблюдений расположены на пяти континентах и островах Тихого океана, что обеспечивает хорошее распределение наблюдений по орбите. В таких условиях появляется возможность не только определять положения отдельных обсерваторий, но и вычислять вековые смещения станций лазерной локации ИСЗ.

Смещение пунктов достигает нескольких сантиметров в год и является следствием движения материков. При лазерной локации спутников получают информацию о движении полюсов, скорости вращения Земли, выявляют движения и деформацию плит, изучают гравитационное поле Земли.

3. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

3.1. Понятие о современных движениях земной поверхности

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.

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.

Современные движения земной поверхности являются составной частью окружающей среды, и на поверхности земного шара не найдется ни одной точки, полностью от них избавленной. Деформационный процесс в земной коре, наблюдаемый в текущее геологическое время, получил название – современные движения земной поверхности (СДЗП). Под современными колебательными движениями земной коры понимают те движения, которые изучаются инструментальными методами (повторные нивелировки, наклономерные измерения, измерения изменений силы тяжести и др.).

Установлено, что земная кора и вся поверхность Земли испытывает сложные, разнообразные колебания [5].

По скорости и масштабам распространения СДЗП делятся на следующие виды:

– медленные или вековые (наблюдаются практически повсеместно со скоростью первых миллиметров в год). Эти фоновые суммирующие (результатирующие) 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;

- средние или предвестниковые (наблюдаются в сейсмоактивных районах со скоростью порядка 10 мм/год и более);

- быстрые или сейсмические, т. е. движения, сопровождающие землетрясения и извержения вулканов; величины этих движений достигают метра и более в зависимости от силы землетрясения или извержения.

Наиболее контрастные СДЗП присущи современно активным тектоническим областям: активизированным материковым платформам, рифтовым зонам, срединно-океаническим хребтам, границам столкновения литосферных плит и т. д. [6].

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.

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, сосредоточено 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

десяток разрушительных землетрясений, два из которых Чиликское 1889 г. и Кеминское 1911 г. имели магнитуду более 8 баллов и вошли в ранг мировых сейсмических катастроф.

Исследования по прогнозу землетрясений в Казахстане начались со второй половины 70-х годов XX в. созданием экспериментальной базы Алматинского прогностического полигона [7]. 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 балльные землетрясения в Атырауской, Западно-Казахстанской и Карагандинской областях, 7–балльное 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.

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 безопас-

ности природной среды. Известно, что интенсивная добыча полезных ископаемых приводит к увеличению нагрузки на недра, и, как следствие, к созданию условий для возникновения техногенных землетрясений.

Детальное исследование каждого вида движений на всей земной поверхности представляется важным и необходимым. Все они тесно связаны друг с другом, так как медленные СДЗП на некоторых участках земной коры могут перерасти в средние, а затем и в быстрые. Все виды СДЗП довольно просто фиксируются с помощью геодезии. В самом деле, любое деформирование земной коры, в которой закреплены центры геодезических пунктов, непременно проявится в изменении взаимного положения этих центров, а также в изменении локального гравитационного поля, сопровождающего деформации.

3.2. Общие сведения о методах изучения СДЗП

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.

Геофизические работы по изучению деформаций земной поверхности имеют длительную историю. К геофизическим методам определения СВДЗК относятся: сейсмические, магнитометрические, гравиметрические, геотермические, магнитотеллурическое зондирование [8].

Для решения вопроса о современных движениях земной коры, широкое применение получил комплекс методов, исполь-

зуемых одновременно для своих прямых целей – для изучения изменений естественного электрического поля, изменений элементов магнитного поля, изменений упругих свойств горных пород и т. д. Кроме этого, применяют специальные гравиметрические методы. Но эти наблюдения производятся далеко не на каждой геофизической станции, а обработка их требует специальных познаний. Значительно шире используются и более доступны методы сейсмологии, которыми изучают землетрясения. На сейсмических станциях для этих наблюдений применяются вертикальные и горизонтальные сейсмографы различных типов.

Сейсмичность – один из чувствительных показателей интенсивности современных тектонических движений, и все данные, характеризующие сейсмичность изучаемого района, крайне интересны и для изучения молодых движений земной коры. 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.

Наклономерные наблюдения определяют величину и форму возникающих аномальных наклонов, указывающих на возможность возникновения землетрясения. Первые сети наклономерных станций были созданы в Японии в 30-х годах XX в. Наклономерные наблюдения определяют величину и форму возникающих аномальных наклонов, указывающих на возможность возникновения землетрясения. Для непрерывной регистрации

изменений деформаций земной поверхности используются деформографы (экстензометры), маятниковые и жидкостные наклонометры 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 наклонометрам 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; наклонометры – для измерения угла наклона земной поверхности и вертикальных сдвиговых деформаций и длиннобазисные гидростатические уровни – для измерения относительных вертикальных смещений.

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

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 связаны 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 предусматривают мониторинг электрического сопротивления земной коры для поиска предвестников землетрясений.

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 становится выше, в других ниже.

Для выявления современных движений земной поверхности и их количественной оценки широко используются мареографические 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 мареографов и футштоков и показывают величину высоты уровня в момент отсчета с точностью до 1 см.

Гидрологические методы чрезвычайно широко используются для определения новейших движений земной коры и их количественной оценки. Сущность их заключается в измерении уровня воды в океанах или озерах. Уровень этот зависит от двух причин: либо от изменения объема воды в результате метеорологических влияний, либо в результате движений суши. Эти явления следует различать. Методы дают надежные результаты.

Все точки наблюдения, расположенные на побережье, подвержены неравномерному вертикальному перемещению, и невозможно найти такой репер, по отношению к которому средний многолетний уровень оставался бы без изменения. Поэтому при определении смещения нулей футштоков, вызванного неравномерностью вертикальных перемещений, приходится пользоваться лишь кривой колебаний уровня по данному футштоку. Однако, чтобы определить влияние тектонического фактора на колебания, необходимо вводить различные поправки (на изменение атмосферного давления, ветер, осадки, испарение и пр., на приливы и отливы), которые обычно определяются при помощи сложных математических расчетов. Когда выяснены собственные колебания уровня, можно определить вертикальные движения земной коры.

Сбор всех указанных данных, касающихся метеорологических факторов, приливо-отливных движений, особенности пунктов установки футштоков и т. д., имеет значение для обработки данных водомерных наблюдений при определении по ним современных колебаний земной коры.

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 сейсмотектонической 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 торона 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 Ташкентским 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.

3.3. 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. Геодезические методы применяются для выявления горизонтальных и вертикальных смещений отдельных участков земной поверхности.

Для изучения современных движений земной коры применяют повторные триангуляции и измерения линий базисов. 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. Наиболее точным методом изучения вертикальных движений является метод повторного высокоточного нивелирования. 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.

Проводимые повторно в одних и тех же местах, они позволяют оценивать в абсолютных величинах смещения за известный период времени.

Необходимо собрать данные о проведении указанных выше повторных наблюдениях и проанализировать их. Вертикальные движения точек реперов могут быть связаны с особенностями

грунтов, на которых установлен репер (разбухание пород, явления просадки и пр.), с влиянием уровня грунтовых вод и его динамики, с наличием вечной мерзлоты и т. д. Выяснение всех этих вопросов на месте представляет большую ценность при определении современных тектонических движений земной коры геодезическими методами.

В последние несколько лет наряду с традиционными геодезическими наблюдениями используются методы спутниковой геодезии. Комбинирование традиционных наземных и спутниковых измерений позволяет достаточно успешно решать поставленные задачи. 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.

Применение высокоэффективных GPS-систем позволит получить полную картину распределения вертикальной и горизонтальной компонент движений и деформаций на территории геодинамического полигона в соответствии с масштабом измерений. Задачей данного исследования является долговременный контроль за современными деформационными процессами на территории геодинамического полигона. Определяются, главным образом, параметры горизонтальных компонентов смещений и деформаций [9].

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.

4. ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОЛИГОНЫ

4.1. Классификация геодинимических 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 геодинимических полигонах (ГДП) [10, 11].

Под термином «Геодинимический полигон» понимается целесообразно выбранная территория, на которой выполняются геодезические, астрономические, гравиметрические и геофизические наблюдения, данные, которых используют для определения движения пунктов земной поверхности. Геодинимические полигоны иногда называют «модельными областями». На большей части геодинимических 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 геодинимических 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 геодинимическим 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 сочлене-

ния 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 [12].

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

4.2. Прогностические геодинамические полигоны

4.2.1. Цели и назначение прогностических ГДП

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

Прогноз землетрясений занимает важное место среди геолого-геофизических проблем и складывается 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 геополлигонов 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 (рис. 24) в Калифорнии (США), где 18 апреля 1906 г. произошло катастрофическое землетрясение, разрушившее город Сан-Франциско.

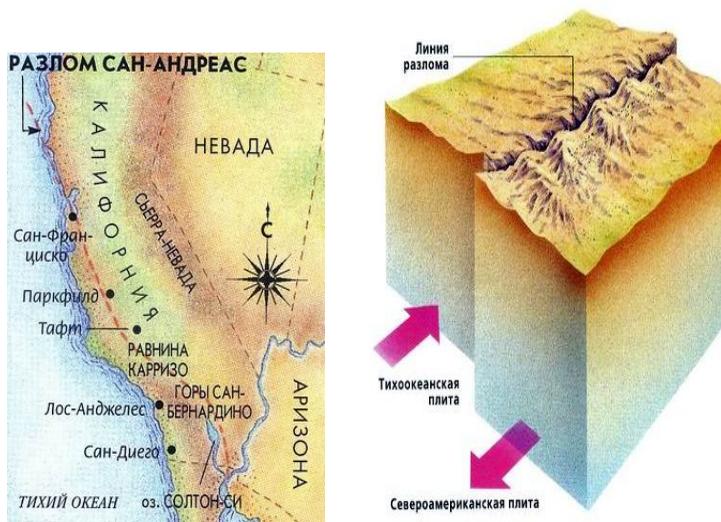


Рис. 24. Разлом Сан-Андреас:
а) положение разлома; б) линия разлома

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.

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 Бишкек, Ташкент, Душанбе, Ашхабад, Алматы. Особый интерес с точки зрения характера региональных и локальных движений представляет собой Алматинский геодинамический полигон, основанный в 1967 г., и охватывающий один из самых сейсмоактивных районов Республики Казахстан [13, 14].

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.

4.2.2. 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), Верненское (1887), Чиликское (1889) и Кеминское (1911) 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 г. Верном величина вертикальных смещений вдоль трещин достигала 3 м.

2500 км. В 1970–1972 гг. нивелирование этих трасс провели повторно. 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 обеспечила 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. км²) на юге ограничена оз. Иссык-Куль, на севере – линией железной дороги Луговая – Алматы – 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, HA -1, H-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.

На территории Республики Казахстан создан ряд прогнозных геодинамических полигонов (табл. 10) [15].

Характеристика прогностических полигонов
в Республике Казахстан

Название полигона	Год (ы) создания полигона	Расположение полигона	Базовые геодезические методы гео-динамического мониторинга
Алматинский (Малый)	1971-1972	г. Алматы и пригороды	линейно-угловая сеть, повторное высокоточное нивелирование, GPS-наблюдения
Шелекский (Алгабасский)	1973	в эпицентральной зоне Чиликского землетрясения, в 125 км от г. Алматы	линейная сеть, повторное высокоточное нивелирование, GPS-наблюдения
Талгарский	1978	Талгарский полигон Института физики Земли, г. Талгар	повторное высокоточное нивелирование
Жамбылский	2004	г. Тараз и пригороды. Часть пунктов полигона на территории Республики Кыргызстан	линейная сеть, повторное высокоточное нивелирование
Зайсанский	2006	в эпицентральной зоне Зайсанского землетрясения, в 22 км от пос. Бакасу	повторное высокоточное нивелирование

Для изучения СДЗП, предвестников крупных землетрясений и усовершенствования методики наблюдений СДЗП в Казахстане в 1971–1972 гг. 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 [16]. 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 км².

На полигоне систематически велись 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 км². 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 простираения тектонических разломов. Наиболее протяженными являются Талгарский и Аксайский профили. Аксайский и Котурбулакский профили созданы в 1979 г. и имеют общую протяженность 27,2 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.

Геодезические работы на Алматинском полигоне для определения современных вертикальных движений земной поверхности выполняются методом повторного нивелирования I и II классов. К настоящему времени выполнено около 50 циклов нивелирования I и II класса. Повторные высокоточные нивелирные геодезические измерения дают возможность установить скорость современных вертикальных движений.

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.

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. Пункты существующей линейно-угловой сети Алматинского ГДП могут служить каркасом при реконструкции Алматинской городской геодезической сети с использованием спутниковых технологий [17].

В середине 1973 г. в эпицентральной зоне Чиликского (1889) землетрясения была заложена линейная сеть – Шелекский (Алгабасский) полигон. Линейно-угловое построение на Шелекском ГДП выполнено 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 геодинимического 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 I класса высокоточным теодолитом Т-05, длины линий измерялись светодальномерами «Кварц» и «Геодиметр», «Дистомат DI 3000 S». Для определения базовых линий в плановой геодезической сети I класса на Шелекском ГДП в 2005 г. были выполнены спутниковые наблюдения с использованием GPS-аппаратуры.

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.

4.2.3. Основные геодезические построения на прогностических геодинамических полигонах

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

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 [11,18]. 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 превысить 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. 26). 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;

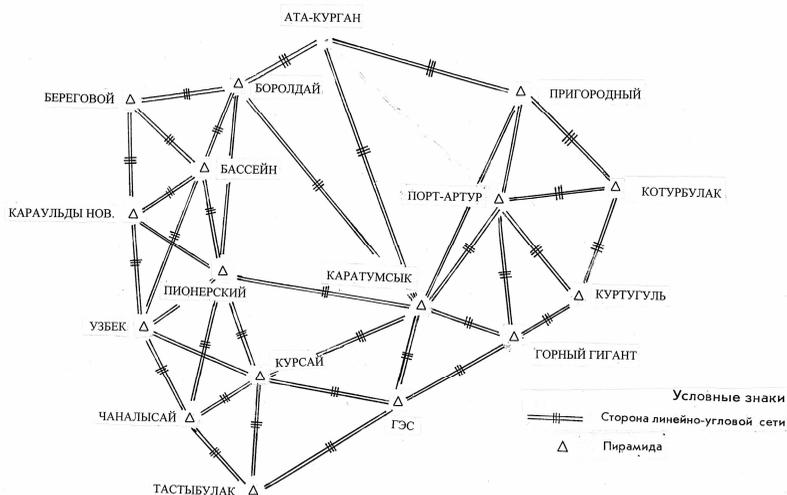


Рис.26. Линейно-угловая сеть Алматинского ГДП

– 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 государственной геодезической сетью (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 [19].

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. 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 [20]. 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 (измерение направлений круговыми приемами). Угловые измерения на пунктах геодезической сети выполняются в соответствии с требованиями [19]. 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. К теодолитам предъявляются повышенные требования (табл. 11).

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.

Таблица 11
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

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

$$n(n-1)/2, \quad (15)$$

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:

$$\begin{aligned} (1,2) &= (1,4) - (2,4); & (1,2) &= (1,3) - (2,3); \\ (1,4) &= (1,3) + (3,4); & (1,4) &= (1,2) + (2,4). \end{aligned}$$

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

$$\sigma = 180^0 / m + i, \quad (16)$$

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

Величина m определяется по формуле

$$P = m \times n, \quad m = P / n, \quad (17)$$

где n – число направлений.

Внутри приема также идет перестановка лимба на угол

$$\delta = \frac{\sigma}{n-1} + i \quad (18)$$

при n – четном,

$$\delta = \frac{\sigma}{n} + i \quad (19)$$

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 [21].

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. Во втором полуприеме трубу вращают в обратном направлении, выполняя аналогичные действия.

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 (22).

Основные допуски при измерении горизонтальных направлений способом круговых приемов и углов способом Шрейбера указаны в [19].

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 колеблющиеся 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 вводиться поправка за уклонение отвесных линий, т. к. ее не учет может привести к заметному искажению координат пунктов [21]. Поправка за уклонение отвесной линии вычисляется по формуле

$$m_{in} = (\eta_i \cos A_{in} - \xi_i \sin A_{in}) \times tqZ_{in}, \quad (20)$$

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

$$m_1 = \pm \sqrt{[W^2]/3n}, \quad m_2 = \pm \sqrt{\pi/6 \cdot [W]/n}. \quad (21)$$

$$Q = [W]/3n, \quad (22)$$

где W – невязка треугольников; n – число треугольников.

Целевые назначения и повышенная точность сетей, создаваемых на ГДП, обуславливают 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. Точность определения горизонтальных деформаций зависит также от точности измерения длин линии в сети.

Для линейных измерений при изучении плановых деформаций используются в основном светодальномеры и радиодальномеры для измерения длинных линий [22].

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. 12. 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 12
Сравнительные технические характеристики светодальномеров

Модель	Страна производитель	Точность измерения расстояний	Дальность действия, м
«Гранат»	Россия	5 мм+2ppm×D	20 000
СГ-3	Россия	4 мм+1ppm×D	20 000
ДК 001	Россия	0,8 мм+1,5ppm×D	600
МСД-1м	Россия	2 мм+5ppm×D	500
Блеск 2	Россия	5 мм+3ppm×D	5000
2СТ-10	Россия	2 мм+2ppm×D	10 000
Geodimeter 122	Швеция	5 мм+2ppm×D	3000
Geodimeter MA	Швеция	5 мм+5ppm×D	6000–15 000
Req Eita	ФРГ	5 мм+5ppm×D	3000
С1-450	США	5 мм+5ppm×D	3000
Авторейджер III	США	5 мм+2ppm×D	4000
RED 2	Япония	5 мм+5ppm×D	5000
ND 3000	КНР	5 мм+3ppm×D	5000
Мекометр ME 3000	Швейцария	0,2 мм+1ppm×D	3000
Дистомат D120	Швейцария	5мм+1ppm×D	9000
DM 503	Швейцария	3мм+3ppm×D	5000
Теллуrometer 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. 13.

Таблица 13
Технические характеристики радиодальномеров

Модель	Страна изготовитель	Дальность действия, км	Точность измерения расстояний
«Луч»	Россия	40	3 см+3 мм/км
«Волна»	Россия	15	3 см+3 мм/км
Варидист GET – А2	Венгрия	30	3 см+2 мм/км
Теллуrometer MRA5	Великобритания	50	10 см+3 мм/км
Теллуrometer MRA6	Великобритания	50	10 см+3 мм/км
Теллуrometer CA1000	Великобритания	30	15 см+5 мм/км
Электротейп DM 20	США	50	10 см+3 мм/км
Дистомат DI 50	Швейцария	150	2 см+5 мм/км
SIAL MD 60 C	Швейцария	150	10 мм+5 мм/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. 14.

Таблица 14
Предельные расхождения длин линий

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

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. 15.

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.

Таблица 15
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

СКП измерения расстояния для каждой стороны вычисляется по формуле

$$m_s = \sqrt{V^2 / n(n-1)}, \quad (23)$$

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 [22, 23].

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 [24]. Эта ошибка является основной, препятствующей точности измерения больших расстояний с ошибкой менее $1 \cdot 10^{-6} D$. 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 0,1⁰ по психрометру Ассмана.

Температура влажного воздуха измеряется, как правило, на ведущей станции. Поправки метеоусловий могут вводиться 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

$$\Delta A_{t_m} = -(A_{t_m \text{ведущ.}} - A_{t_m \text{ведом.}}) \times D_o, \quad (24)$$

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:

$$V_{i/l} = (i - l) \times \sin \alpha - 8,33 \times 10^{-5} (i + l) \times D_o \text{ км}, \quad (25)$$

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

2. Приведение наклонной линии к горизонту выполняется по формуле

$$\delta_h = -(h^2 / 2D + h^4 / 8D^3), \quad (26)$$

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

$$D_l = D_o - \delta_h. \quad (27)$$

3. Приведение горизонтального проложения на уровень моря выполняется по формуле

$$\delta_H = -(kD_{II}H_m \times 10^{-3} + \Delta), \quad (28)$$

где

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

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

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

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

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

$$\delta\zeta = [H_2 - H_1 / D \times (\zeta_2 - \zeta_1) + \zeta_1 + \zeta_2 / 2R \times D] \times 10^3, \quad (29)$$

где ζ_1 и ζ_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

$$\delta_L = (k_1 + k_2) \times D_{III} / k_3, \quad (30)$$

где

$$k_1 = (y_m^2 / 2R^2 + y_m^4 / 24R^4) \times 10^7;$$

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

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

$y_m = (y_1 + y_2) / 2$ – средняя ордината; $\Delta y = y_2 - y_1$ – разность ординат конечных точек стороны; R_i – средний радиус кривиз-

ны 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), Leica (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.

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

Целевое назначение и повышенная точность сетей, создаваемых на геодинамических полигонах, обуславливают необходимость включения статистического анализа в математическую обработку геодезических измерений.

Целью статистического анализа является: оценка качества различных рядов измерений. На основании выполненного анализа и оценки точности составляется заключение о достоверности и пригодности геодезических измерений для дальнейшей математической обработки и интерпретации современных горизонтальных движений земной коры.

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 [25]. 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 [26].

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

$$r = \sqrt{\Delta x_{ik}^2 + \Delta y_{ik}^2}, \quad (31)$$

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

$$\left. \begin{aligned} u_j &= x_j'' - x_j'; & u_k &= x_k'' - x_k', \\ v_j &= y_j'' - y_j'; & v_k &= y_k'' - y_k', \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

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

$$\left. \begin{aligned} x_j' &= X_j' - X_i', & y_j' &= Y_j' - Y_i', \\ x_k' &= X_k' - X_i', & y_k' &= Y_k' - Y_i', \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

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:

$$\gamma_m = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}; \quad (34)$$

$$\gamma_1 = \frac{-x_j v_k - y_j u_k + x_k v_j + y_k u_j}{x_j y_k - x_k y_j}; \quad (35)$$

$$\gamma_2 = \frac{x_j u_k - y_j v_k - x_k u_j + y_k v_j}{x_j y_k - x_k y_j}; \quad (36)$$

$$\gamma_1 = \frac{x_j v_k - y_j u_k - x_k v_j + y_k u_j}{x_j y_k - x_k y_j}; \quad (37)$$

$$\omega = \frac{x_j u_k + y_j v_k - x_k u_j - y_k v_j}{2(x_j y_k - x_k y_j)}; \quad (38)$$

$$E_1 = (\Delta + \gamma_m) / 2; \quad (39)$$

$$E_2 = (\Delta - \gamma_m) / 2; \quad (40)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right) \text{ при } \gamma_1 < 0 \quad (41)$$

или

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right) + 90^\circ \text{ при } \gamma_1 > 0. \quad (42)$$

где 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, 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 (рис. 27). Места сгущения изолиний показывают площадное распределение областей растяжения и сжатия исследуемой территории не только качественно, но и количественно.

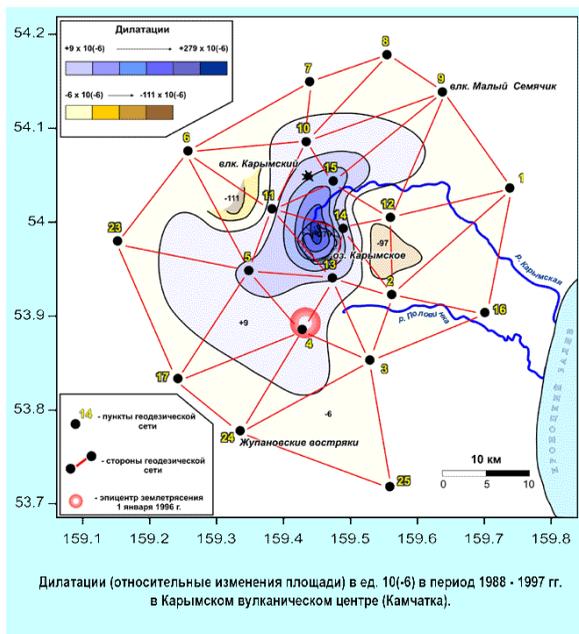


Рис. 27. Картосхема дилатации

4.2.4. Основные высотные построения на прогностических ГДП

4.2.4.1. 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.

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 со-

временной 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. 28).

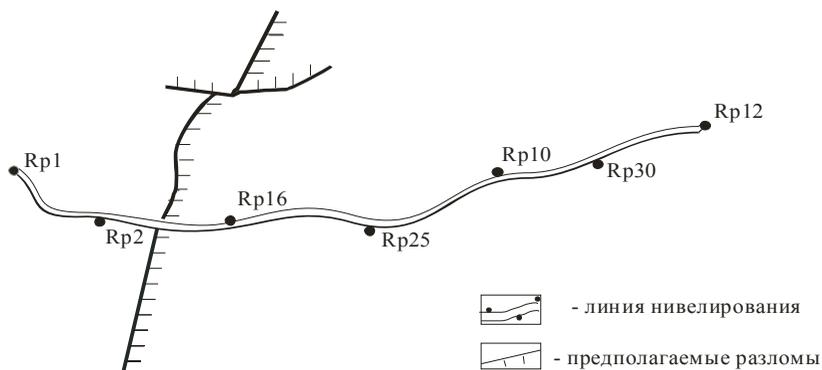


Рис. 28. Линия нивелирования в зоне разлома

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 [27, 28]. К устойчивости геодезических знаков предъявляются высокие требования.

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 1 км от линии нивели-

рования 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 30–70 м 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 [27, 28].

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. 16).

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 приблизительно совмещают изображения пузырьков уровня и после этого производят дальномерные отсчеты по трем нитям;

Таблица 16

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

Примечание: 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 рейке 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 $\pm 3\sqrt{L}$, где L – длина секции в км [28, 29]. В некоторых слу-

чаях 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 $\pm 5 \text{ мм } \sqrt{L}$, 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 17

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 [27].

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 $\pm 5 \text{ мм} \sqrt{L}$ для секций, на которых среднее число станций менее 15 на километр хода, и $\pm 6 \text{ мм} \sqrt{L}$ 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 $\pm 8 \text{ мм} \sqrt{L}$ (или соответственно $\pm 10 \text{ мм} \sqrt{L}$), 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 $\pm 5 \text{ мм} \sqrt{L}$, 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 [30, 31, 32, 33], предложены программы наблюдений с использованием цифровых нивелиров.

В основу программ нивелирования I класса положен принцип наблюдения на станции по схеме ($Z_0P_0P_dZ_d$), хотя нельзя отбрасывать и возможность применения схемы ($Z_0Z_dP_0P_d$). Нивелирование может быть выполнено по четырем программам наблюдений (табл. 18). Последовательность наблюдений на станции при нивелировании I класса показана в табл. 19.

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 штрихкодовых (к) реек и нивелира только с цифровым отсчитыванием. Максимальная длина визирного луча S обусловлена техническими возможностями оптической системы прибора.

Таблица 18
Программы цифрового нивелирования I класса

Класс нивелирования	Smax, м	Программа работы на станции	Число линий (горизонтов прибора)	Число ходов	Число превышений	$\Delta S, м$	$\Sigma \Delta S, м$
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)			4		
					2		

Таблица 19
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
C (1k+1k)	Нечетная	З _к , П _к , П _к /, З _к /	З _к , П _к , П _к /, З _к /	П _к , З _к , З _к /, П _к /	П _к , З _к , З _к /, П _к /
	Четная	П _к , З _к , З _к /, П _к /	П _к , З _к , З _к /, П _к /	З _к , П _к , П _к /, З _к /	З _к , П _к , П _к /, З _к /
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_к⁰, З_к⁰ – отсчеты по обеим сторонам штрих-кодовой рейки; З_ш, П_ш – отсчеты по штриховой шкале с помощью оптического микрометра; З_к/, П_к/ – отсчеты после изменения микрометра; (З_к, П_к)_{1,2,3,4}, (П_к, З_к)_{1,2,3,4} – отсчеты в порядке возрастания по ходу часовой стрелки и против её хода

Программа В 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 С наблюдения на станции применяется только при наличии одной штрих-кодовой стороны рейки. Программа С 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 ($3_k P_k$); изменение горизонта на

2 – 4 мм; отсчёты (P_k' , $3_k'$);

– 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, существующих нивелирам с компенсаторами, необходимо произвести переустановку нивелира по круглому уровню. Например, одним из подъёмных винтов надо вывести пузырёк из нуля 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. 29).

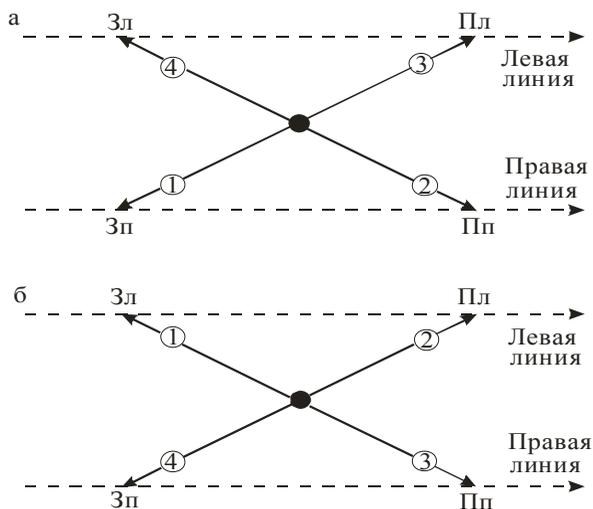


Рис. 29. Последовательность наблюдений на нечётной станции по программе D

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 E наблюдений на станции применяется при наличии рек 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. 20) [31]. Общим для всех программ является сохранение технологической схемы проложения нивелирного хода в прямом и обратном направлениях.

Таблица 20

Последовательность наблюдений на станции при нивелировании II класса

Программа наблюдений	Станция	Последовательность наблюдения реек на станции	
		Прямой ход	Обратный ход
А (2к)	Нечетная	$З_K, П_K, П_K^0, З_K^0$	$П_K, З_K, З_K^0, П_K^0$
	Четная	$П_K, З_K, З_K^0, П_K^0$	$З_K, П_K, П_K^0, З_K^0$
В (1к+1ш)	Нечетная	$З_K, П_K, ПШ, ЗШ$	$П_K, З_K, ЗШ, ПШ$
	Четная	$П_K, З_K, ЗШ, ПШ$	$З_K, П_K, ПШ, ЗШ$
С (1к+1к)	Нечетная	$З_K, П_K, П_K', З_K'$	$П_K, З_K, З_K', П_K'$
	Четная	$П_K, З_K, З_K', П_K'$	$З_K, П_K, П_K', З_K'$
D (1к+1к)	Нечетная	$З_K, П_K$	$П_K, З_K$
	Четная	$П_K, З_K$	$З_K, П_K$

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 выполняются 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 [34].

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

$$\delta h = \alpha_{\text{сред.}} \left[\sum_{\text{З}} (t'_H - t_{\text{Э}}) - \sum_{\text{П}} (t''_H - t_{\text{Э}}) \right], \quad (43)$$

где $\alpha_{\text{сред.}}$ – средний коэффициент линейного расширения инвариантных реек; $t'_H, t''_H, t_{\text{Э}}$ – 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, а также прецизионные инварные рейки.

Поскольку большинство геодинамических полигонов расположено 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. 30).

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.



Рис. 30. Цифровой нивелир Trimble DiNi 12 и штрих-кодовая рейка

По сравнению с оптическими нивелирами, нивелиры Trimble DiNi имеют значительно большую точность. Возможность измерения расстояний позволяет быстро выравнять 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.

4.2.4.2. 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

$$d_1 = (h_{\text{прав}} - h_{\text{лев}})_{\text{прямо}} ; \quad (44)$$

– из правого и левого нивелирования обратного хода

$$d_2 = (h_{\text{прав}} - h_{\text{лев}})_{\text{обр}} ; \quad (45)$$

– из прямого и обратного ходов правого нивелирования

$$d_3 = (h_{\text{прям}} - h_{\text{обр}})_{\text{прав}} ; \quad (46)$$

– из прямого и обратного ходов левого нивелирования

$$d_4 = (h_{\text{прям}} - h_{\text{обр}})_{\text{лев}} ; \quad (47)$$

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

$$d_5 = \frac{1}{2}(h_{\text{прям}} + h_{\text{обр}})_{\text{прав}} - \frac{1}{2}(h_{\text{прям}} + h_{\text{обр}})_{\text{лев}} ; \quad (48)$$

– из средних результатов прямого и обратного ходов

$$d_6 = \frac{1}{2}(h_{\text{прав}} + h_{\text{кле}})_{\text{прям}} - \frac{1}{2}(h_{\text{прав}} + h_{\text{лев}})_{\text{обр}}. \quad (49)$$

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

$$\Sigma d_5 = \frac{1}{2}(\Sigma d_1 - \Sigma d_2), \quad (50)$$

$$\Sigma d_6 = \frac{1}{2}(\Sigma d_3 + \Sigma d_4). \quad (51)$$

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:

$$m_1 = \pm 1,2 \text{ мм} \sqrt{L} \quad (\text{для } d_1, d_2, d_3, d_4), \quad (52)$$

$$m_2 = \pm 0,84 \text{ мм} \sqrt{L} \quad (\text{для } d_5, d_6). \quad (53)$$

С целью получения представления о характере и величине систематических ошибок для каждой линии нивелирования I класса строят графики накоплений величин d_i [35].

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: $\Delta_1 = d_i$; $\Delta_2 = d_{i1} + d_{in} \dots$; $\Delta_n = d_{i1} + d_{i2} + \dots + d_{in}$.

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

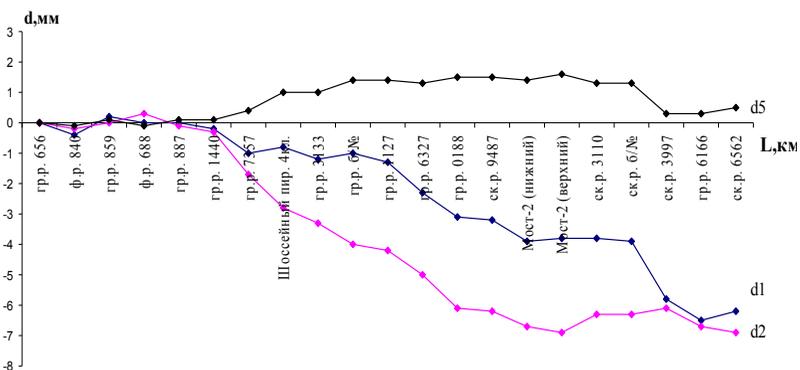


Рис.31. График накопления величин d_1, d_2, d_5 на Аксайском профиле

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

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

$$m = \pm 1,7 \text{ мм } \sqrt{L}. \quad (54)$$

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

$$\eta^2 = \frac{1}{4n} \left[\frac{d^2_5}{r} \right] \quad (55)$$

и

$$\eta^2 = \frac{1}{4n} \left[\frac{d^2_6}{r} \right], \quad (56)$$

а для нивелирного хода II класса –

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

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

$$\sigma^2 = \frac{1}{4[L]} \left[\frac{S^2}{L} \right]. \quad (58)$$

Величины S берут с графика как разности ординат прямой проведенной на графике симметрично относительно кривой одностороннего 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):

$$W_{\text{дон}} = \sqrt{25(L_I + L_{II})}. \quad (59)$$

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

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{1}{N} \left[\frac{W^2}{P} \right]}, \quad (60)$$

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 време-

ни 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 [35].

По полученным вычислениям разностей превышений построен график накопления разностей превышений (рис. 32).

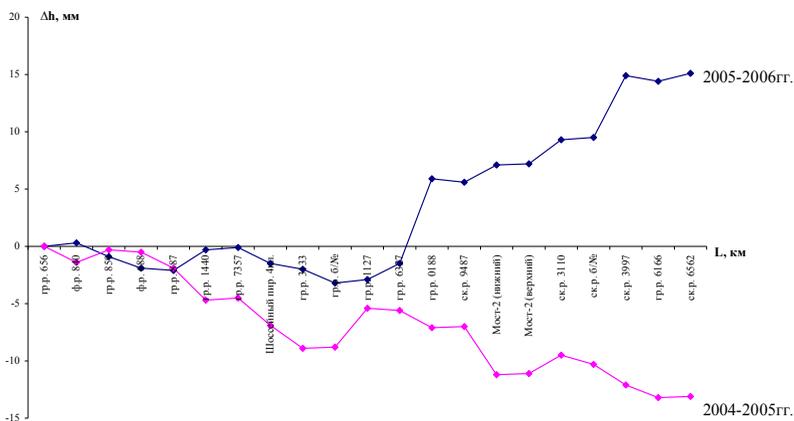


Рис. 32. График накоплений Δh на Аксайском профиле

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 выше 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.

Идея пространственно-временных графиков (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: повторно-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 [36]. 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) [37, 38, 39, 40].

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 разно-

сти превышений берутся со своим знаком. Если нет, то знаки Δh этой линии меняются на обратные. Прodelав 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 обратным 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.

$$v = \frac{h_2 - h_1}{\Delta T}, \quad (61)$$

где ΔT – интервал времени между нивелировками.

Средние квадратические погрешности скоростей вычисляются по формуле

$$m_v = \frac{\sqrt{(m_1^2 + m_2^2)S}}{\Delta T}, \quad (62)$$

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. 21.

Таблица 21

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

$$H_i = H_{исх.} + h_{исх.i}, \quad (63)$$

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

$$v = \frac{H_2 - H_1}{\Delta T}, \quad (64)$$

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

$$\text{grad } v = \frac{v_A - v_B}{l_{AB}}, \quad (65)$$

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

На рис. 33 показана карта скоростей современных вертикальных движений на территории Республики Казахстан [40].

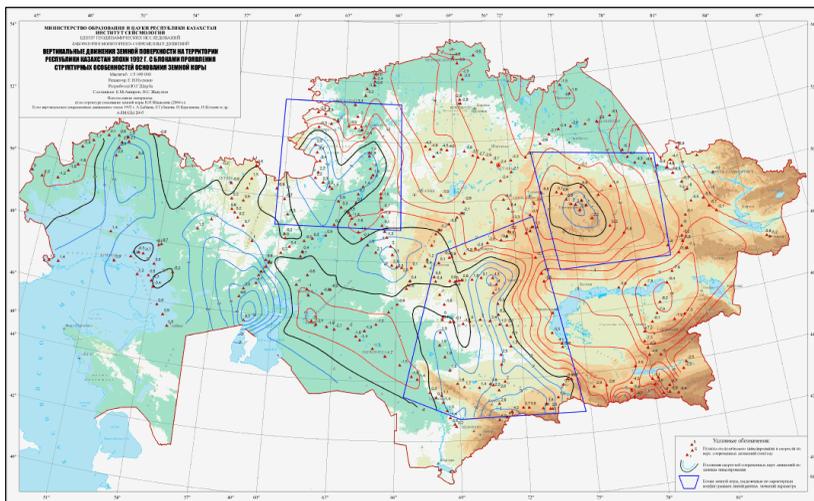


Рис. 33. Скорости современных вертикальных движений на территории Республики Казахстан

5. СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

5.1. 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 [41].

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 [42]. 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 ITRF (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 по 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 слу-

жить 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 [42] глобальной GPS-сети карта векторов движения основных блоков Евро-Азиатского континента (рис. 34) показывает, что генеральным направлением движения Европейской части континента является северо-восточное.

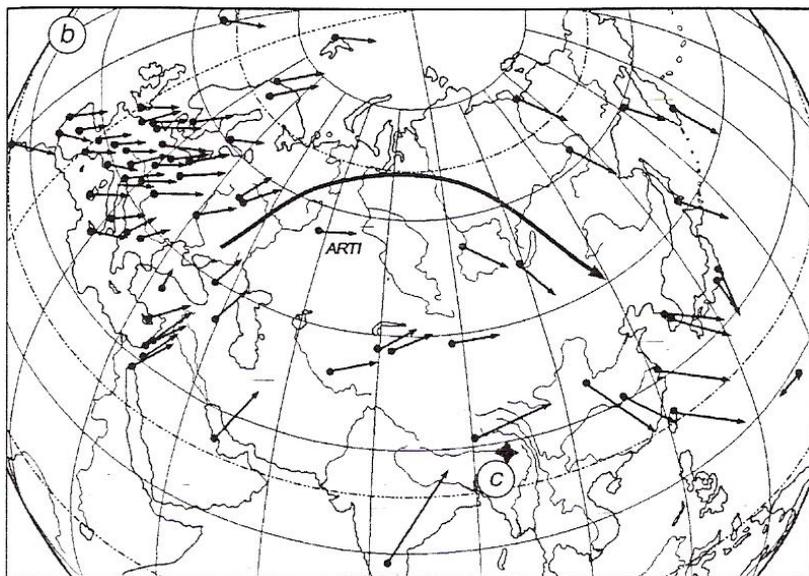


Рис. 34. Векторы движений основных блоков Евро-Азиатского континента

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, Тарбагатай, Алтай. 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.

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.

5.2. Общая структура и состав спутниковых навигационных систем

Изучение СДЗП требует проведения в мониторинговом режиме высокоточных геодезических измерений смещений реперов специально оборудованных геодинамических полигонов. В последние годы наряду с традиционными геодезическими наблюдениями для определения деформаций земной поверхности используются методы спутниковой геодезии, позволяющие достичь точность порядка $1-2 \times 10^{-7}$ на расстояниях 5–15 км. 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.

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 используются следующие пространственно-временные режимы:

- разовое переопределение исходных координат пунктов ГГС и опорных геодезических сетей;
- мониторинговый режим измерения величин смещений и деформаций;
- комбинированный режим, предусматривающий переопределение исходных координат пунктов наблюдательной станции при выполнении нулевого цикла работ, и определение смещений и деформаций при выполнении последующих циклов измерений, произошедших за определенный период времени.

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 устанавливаются 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 находятся и третья Европейская спутниковая навигационная система «Галилео». 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. Энерго-снабжение 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.

Табл. 22 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 бывшего 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.

Таблица 22
Сравнительная характеристика GPS и GLONASS

Характеристики систем	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
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)
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

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. 23) при совместном использовании систем GPS + GLONASS.

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 МГц, который несет навигационное сообщение и SPS код и L2 с частотой 1227.60 МГц, 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 МГц псевдо-случайный шум (Pseudo-Random Noise (PRN)). C/A код повторяется каждые 1023 бита (одна 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 собой очень длинный (семь дней) 10 МГц 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.

Спутники GPS выводятся точно на свои орбиты, и поскольку на высоте 20 000 км атмосферное торможение отсутствует, остаются на них в течение длительного времени. Ресурс спутника на орбите 7,5 лет. Каждый приемник содержит в памяти ком-

пьютера «альманах» – справочник, из которого видно, где будет находиться 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.

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 частоты, на которых работает приемник;
- одно-и многоканальные в зависимости от количества ИСЗ, которые приемник может пеленговать одновременно;
- одно- и многосистемные в зависимости от его возможности работать в различных навигационных системах.

Источники ошибок GPS-измерений. Геометрическая сущность задачи позиционирования 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 позиционирования 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 позиционировании на плоскости;

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

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

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

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

σ_0 – погрешность в данной координате при позиционировании.

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;
- ошибки вычисления орбит;
- инструментальная ошибка приемника;
- многопутность распространения сигнала;
- ионосферные задержки сигнала;
- тропосферные задержки сигнала;
- геометрическое расположение спутников.

5.3. 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 извест-

ными 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 статика. 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 часа 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, используя топографические карты масштаба 1:25 000 до 1: 100 000, в зависимости от обрабатываемой территории. Все пункты сети наносятся на карту вместе с известными (контрольными) пунктами. 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.

Исследование деформаций земной поверхности в мониторинговом режиме, подразумевает многократное, от цикла к циклу, выполнение точных геодезических измерений на одних и тех же пунктах сети, по одной программе работ с дальнейшим анализом изменений геометрических взаимосвязей между пунктами. Из этого вытекает важная особенность геодинамических полигонов: возможность детального изучения условий проведения наблюдений на каждом пункте сети и использование их при планировании времени и периода проведения спутниковых измерений, специальная подготовка отдельных пунктов сети с целью устранения причин затрудненного или некачественного приема спутникового радиосигнала. 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. Некоторые факторы, определяющие качество выполнения наблюдений, можно спрогнозировать заранее, путем использования специального программного обеспечения. Распределение количества видимых спутников и изменение коэффициента PDOP во

времени определяется заблаговременно по имеющимся эфемеридам спутников, а поскольку известны условия наблюдений на каждом пункте сети, составляются индивидуальные картограммы препятствий прохождения спутникового радиосигнала, с использованием которых достигается высокий уровень планируемых и фактических условий наблюдения на конкретном пункте. В результате планирования определяются промежутки времени благоприятные и неблагоприятные для производства наблюдений.

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 меньше 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 20⁰. Последним моментом сессии должен быть тот, когда четвертый спутник покидает ниже высот от 15 до 20⁰.

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

$$n = \frac{s - o}{r - o}, \quad (66)$$

где o – число перекрывающихся между сессиями пунктов.

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

$$n = \frac{m \times s}{r}. \quad (67)$$

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

$$i = n \times r - [s + (n - 1)]. \quad (68)$$

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 20⁰ 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. Процедура наблюдений на пунктах выбирается в зависимости от числа имеющихся приемников, пунктов наблюдений, типа сети, необходимости привязки вновь создаваемой сети к существующей. В результате планирования разрабатывается организационный план и 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 является ряд внутренних 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 одном из геодинамических прогностических полигонов Республики Казахстан для определения базовых линий в плановой геодезической сети I 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 ГДП была установлена над центром геодезического пункта 1 класса с известными координатами в СК-42 пункта 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 т. ч. 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 референс-эллипсоида.

6. ТЕХНОГЕННЫЕ ПОЛИГОНЫ

6.1. 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 г. 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.

Известны многочисленные примеры негативных последствий активизации СД процессов на нефтяных и газовых месторождениях. Среди них нефтяное месторождение Тенгиз (Казахстан) – серьезные осложнения при строительстве глубоких скважин.

Казахстан занимает одно из ведущих мест среди стран СНГ по добычи нефти и газа. Нефте- и газодобыча практически всегда потенциально опасны для загрязнения среды [43, 44]. 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.

В отличие от месторождений твердых полезных ископаемых (рудных, угольных), где основной формой негативных деформационных последствий являются обширные просадки земной поверхности территории всего месторождения, на месторождениях жидких углеводородов наиболее опасные деформационные процессы – это интенсивные локальные аномалии вертикальных и горизонтальных движений в зонах разломов, возбужденные процессами разработки. Эти аномальные подвижки высокоамплитудны (50–70 мм/год), короткопериодичны (0,1–1 год), пространственно локализованы (0,1–1 км), обладают пульсационной и знакопеременной направленностью. Среднегодовые скорости относительных деформаций для них чрезвычайно высоки и составляют величины порядка $(5–7) \times 10^{-5}$ в год. Поэтому их называют суперинтенсивными деформациями (СД) земной поверхности, а разломы, в пределах которых они выявляются, определены, как «опасные».

Комплексное изучение, оценка и объективный прогноз и техногенной сейсмичности и смещений земной коры при разработке месторождений невозможны без организации монито-

ринга 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 сейсмо-деформационных процессов при освоении углеводородного потенциала недр Республики Казахстан [49].

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 и др. [45].

Главной задачей на геодинамических полигонах 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.

6.2. Комплексный геодинамический мониторинг и его исходные предпосылки

Мониторинг недр представляет собой систему наблюдений за состоянием недр для обеспечения рационального использования государственного фонда недр и своевременного выявления их изменений, оценки, предупреждения и устранения последствий негативных процессов [47, 48].

Целью мониторинга недр является информационное обеспечение рационального использования государственного фонда недр, включая подземные воды, а также управления недропользованием и охраной недр.

Одной из основных задач мониторинга является разработка, обеспечение реализации и анализ эффективности мероприятий по экологически безопасному недропользованию и охране недр, предотвращению или снижению негативного воздействия опасных геологических процессов, а также экологическому оздоровлению недр.

Общая задача проведения комплексного геодинамического мониторинга, заключается в изучении закономерности возникновения и развития во времени характерных особенностей современных деформационных природно-техногенных процессов в районе разрабатываемых месторождений углеводородов.

Общая цель организации комплексного геодинамического мониторинга – выработка системы прогностических признаков возникновения вероятных сильных сейсмодеформационных и флюидодинамических процессов на наиболее ранней стадии их развития и принятие мер для снижения или предотвращения возможных последствий [14].

Разработаны основные требования для реализации этой цели, которые состоят в следующем:

- оптимальный состав методов и видов мониторинга;
- комплексный подход к решению проблемы на всех стадиях исследований;
- надежная регистрация всех возможных форм опасных – оценки геодинамического риска на ранней стадии развития опасных сейсмо-деформационных процессов;
- координация геодинамического контроля с мероприятиями по управлению и контролем за разработкой месторождения и охране окружающей среды;
- разработка рекомендаций по применению превентивных мероприятий;
- рациональное финансирование всего комплекса работ.

Вышеуказанная стратегия позволяет получать достоверную комплексную информацию о пространственном распределении и временном изменении параметров природно-техногенных сейсмо-деформационных событий, связанных с разработкой месторождений углеводородов [15].

Содержание и последовательность основных процедур комплексного геодинамического мониторинга показана на рис. 35.



Рис. 35. Блок-схема комплексного геодинамического мониторинга

Комплексный геодинамический мониторинг включает в себя следующие этапы:

- 1) разработка комплексных программ проведения геодинамического мониторинга недр на территории разрабатываемого месторождения углеводородов;
- 2) проведение полевой рекогносцировки для окончательного закрепления пунктов геодинамического мониторинга;
- 3) строительство геодинамического полигона – закладка линий и пунктов для последующего проведения на них измерений;
- 4) повторные или непрерывные комплексные измерения – собственно проведение комплексного геодинамического мониторинга недр в районах с развитой нефтегазодобычей и отдельных месторождений углеводородов;

5) деформационный мониторинг – картирование активных разломов и просадочных явлений;

6) GPS-мониторинг – площадное картирование проседаний земной поверхности и горизонтальных сдвигов массивов горных пород;

7) гравиметрический мониторинг – оценка деформационных процессов в продуктивных отложениях (сжатие, уплотнение пород-коллекторов);

8) сейсмологический мониторинг – регистрация местных, близких, техногенных и индуцированных землетрясений;

9) обработка и анализ результатов мониторинга, сопоставление результатов повторных измерений отдельных методов;

10) аналитические исследования – истолкование (интерпретация) результатов мониторинга, выделение потенциально опасных участков и их соотношение с расположением система и объектов обустройства исследуемого месторождения углеводородов;

11) решение прогностических задач.

В связи с этим, мониторинг за развитием геодинамических процессов осуществляется различными методами, что позволяет при комплексном анализе и интерпретации результатов создавать адекватные модели и вырабатывать комплексные прогностические признаки возможного дальнейшего аномального развития природно-техногенных процессов [50].

Объектами наблюдений должны быть следующие опасные геодинамические процессы:

– тектонические землетрясения, генерируемые активными разломами;

– транзитные землетрясения;

– техногенные (возбужденные) землетрясения, обусловленные разработкой месторождений;

– современные природные и техногенные горизонтальные и вертикальные движения земной поверхности.

Основные требования по рекогносцировке и размещению пунктов геодинамического мониторинга на месторождении углеводородов:

– совмещение по местоположению пунктов различных методов комплексного геодинамического мониторинга;

– обеспечение долговременной сохранности (десятки лет) пунктов, так как они несут всю информацию о природно-техногенных процессах, связанных с разработкой месторождения;

– отсутствие или минимизация антропогенных воздействий и приповерхностных инженерно-геологических факторов (солончак, карст, возможность затопления и подтопления и др.) на устойчивость пунктов геодинамической сети.

Масштабы и этапы организации геодинамического мониторинга, а также основные виды исследований на каждом этапе приведены в табл. 24.

Таблица 24

Типовой состав методов геодинамического мониторинга

Состав методов геодинамического мониторинга	Масштаб исследований		
	Региональный	Зональный	Локальный
1	2	3	4
Объекты исследований	Тектонические структуры и крупные месторождения углеводородного сырья.	Выделенные активные зоны в пределах тектонических структур и крупных месторождений. Отдельные разрабатываемые месторождения	Участки повышенного геодинамического риска.
Этапы исследований	Создание системы мониторинга отдельных структур и крупных месторождений.	Создание зональных систем мониторинга в пределах активных зон и отдельных месторождений.	Создание локальных мониторинговых систем на участках повышенного геодинамического риска.

Продолжение таблицы 24

1	2	3	4
Базовые методы	1. Повторное нивелирование 2. GPS 3. Сейсмологические 4. Гидрогеохимические 5. Дистанционные	1. Повторное нивелирование 2. GPS 3. Сейсмологические 4. Гидрогеохимические 5. Дистанционные	1. Повторное нивелирование 2. GPS 3. Сейсмологические 4. Гидрогеохимические 5. Гравиметрия 6. Сейсмологическое просвечивание.
Периодичность исследований	Пункты 1 и 2 – не менее 2 раза в год. Пункты 3, 5 – не менее 5 месяцев в год. Пункт 4 – режим.	Пункты 1,2,5 — не реже 3-4 раз в год. Пункт 3 – режим.	Пункты 1 и 2 – до 6 раз в год, пункты 3-6 – режим.
Результаты	Выделение активных сейсмодеформационных зон	Локализация потенциальных очаговых зон, выделение суперактивных разломов и зон флюидной разгрузки	Выработка прогностических признаков аномальных геодинамических событий. Оценка риска возникновения техногенных катастроф. Прогноз влияния на окружающую среду

6.3. Высокоточные спутниковые наблюдения на техногенных ГДП

Для обоснования методики проведения высокоточных спутниковых GPS- наблюдений используются «Методическое руководство (регламент) по созданию комплексных геодинамических полигонов и проведению многофункционального мониторинга природно-техногенных сейсмо-деформационных и флюидодинамических процессов при освоении углеводородного

потенциала недр республики Казахстан» и «Методическое руководство по ведению мониторинга современных движений высокоточными спутниковыми GPS-наблюдениями для прогноза геодинамического состояния территорий и нефтегазовых месторождений».

Система GPS является в настоящее время одной из наиболее технологичных и развитых навигационных спутниковых систем. Существует много модификаций методов наблюдений, опирающихся на использование статистических приемов повышения точности, которые широко используются в навигационных измерениях и геодезических задачах. Для задач геодинамического направления исследований преимущественно подходит статический режим наблюдений, фазовый метод позиционирования. В качестве приемных средств GPS пригодными являются двухчастотные приемники с числом каналов не менее 8. При этом необходимо строгое соблюдение других требований к системам, регламенту и методике в целом [51].

Мониторинг в пределах и на прилегающих территориях геологических объектов с ограниченными размерами (десятки или первые сотни квадратных километров) проводят на так называемых локальных сетях GPS.

На локальных сетях решается задача непрерывного во времени прослеживания хода геодинамических преимущественно быстро протекающих процессов естественной, техногенной или комплексной природы. Локальные сети GPS-наблюдений отличаются от региональных повышенной детальностью в пространстве и во времени.

Основные требования к локальным сетям мониторинговых GPS-наблюдений заключаются в следующем:

- 1) локальные сети предназначены обеспечивать исходные данные о современных движениях и соответствующих им деформационных процессах в пределах проекций локальных тел на дневную поверхность с размерами в нескольких десятках километров, от которых ожидаются изменения в поле скоростей;
- 2) размеры площади наблюдений должны превосходить характерные размеры контуров проекции объектов влияния не менее чем на 5–10 глубин до поверхности;

3) локальные сети могут иметь разнообразные геометрические особенности: это системы пунктов, расположенные по площади и сосредоточенные вдоль осевой линии разрывных нарушений с удалением от нее по обе стороны до первых километров; упрощенные сети в виде отдельных треугольников или их системы;

4) расстояние между пунктами наблюдений в локальных сетях может быть от первых метров до десятков километров;

5) по детальности наблюдений сети могут быть:

– детальными – когда используется густое расположение пунктов наблюдения с заданием определенного их количества в пределах контура отслеживаемой скоростной или деформационной особенности минимального размера;

– разреженными – с произвольным числом пунктов;

– индикаторными – в виде одной или нескольких треугольных ячеек с пунктами, не лежащими на одной прямой и образующие треугольники, в идеале равносторонние. Треугольные ячейки по значениям скоростей движения в вершинах позволяют, например, в предположении линейного изменения векторов скорости в любом направлении рассчитать ее значение в центре треугольника, определить практически любые компоненты тензора различного вида деформаций с отнесением их к центру ячейки. За центр принимается точка пересечения медиан треугольника.

Организация локальных сетей GPS-наблюдения обязательно должно включать этапы составления проекта и техническое задание мониторинга, заложение пунктов наблюдения на местности с предварительным тестированием условий наблюдения, обработки системы передачи исходной информации приемников и центр постобработки. В процессе мониторинга необходимо предусмотреть модернизацию сетей, основываясь на предварительно полученных данных и оценке их соответствия задачам мониторинга.

Размещение пунктов GPS-системы на разрабатываемых месторождениях углеводородов производится, как правило, в два этапа. Первый этап включает закладку и производство измерений по так называемой рекогносцировочной сети. Эта сеть соз-

дается с целью получения информации о региональных и зональных проявлениях современных деформационных процессов. Программа мониторинга предусматривает единовременное заложение пунктов GPS-системы в пределах месторождений и прилегающей территории.

Среднее расстояние между пунктами основной и рекогносцировочной сети должно составлять около 5–7 км.

Система пунктов должна удовлетворять следующим требованиям:

- размещаемые пункты должны характеризовать деформационное состояние геологической среды в пределах разрабатываемых месторождений углеводородов и ближних к ним зон;

- пункты GPS-системы должны быть совмещены с пунктами и системами наблюдений других видов работ (например, находиться на расстоянии не более 50 м от нивелирного пункта);

- GPS-наблюдения должны проводиться одновременно с другими видами наблюдений;

- должна быть обеспечена долговременная сохранность пунктов GPS-системы.

Созданная система наблюдений должна состоять из совокупности пунктов двух рангов – опорных и рядовых. Опорные пункты составляют 10–15 % от общего количества пунктов и размещаются за пределами месторождения, что позволяет контролировать региональную (фоновую) обстановку. Один из опорных пунктов должен быть расположен на значительном удалении от территории месторождения (до 2–3 км в зависимости от размеров месторождения) и работать в автоматизированном режиме в период каждого цикла наблюдений. Все это позволит получить требуемую точность наблюдений на рядовых пунктах. Среднеквадратическая ошибка определения координат должна составлять в среднем: в плане от $\pm 0,4$ – $0,6$ мм до $\pm 2,0$ – $2,5$ мм; по высоте от $\pm 1,0$ – $1,5$ мм до $\pm 2,5$ – $2,8$ мм.

Рядовые пункты GPS-системы закладываются в пределах разрабатываемых месторождений углеводородов. Основное назначение рядовых пунктов – контроль за деформационными процессами на отдельных локальных участках. Схема располо-

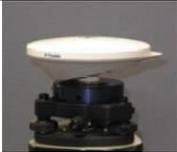
Оборудование для GPS-наблюдений подразделяется на основное и вспомогательное. К основным средствам относятся полевая (пользовательская аппаратура для GPS-наблюдений), штатный состав, который для различных моделей и изготовителей может различаться. Основу штатного состава комплектов представляют собственно приемники.

Для контроля за деформационными процессами требуется наивысшая точность определения параметров деформаций, поэтому для проведения наблюдений должны быть использованы специализированные геодезические приемники спутниковых сигналов и антенны, технические характеристики которых показаны в табл. 25 и 26.

Таблица 25
Технические характеристики GPS оборудования –
GPS приемники

GPS приемники				
Название модели GPS приемника	Тип приемника	Измерения	Точность при статической съемке	Фотографии
Trimble 5700 L1,L2	Двухчастотный	24 канала для L1 C/A кода, фазы несущей L1/L2 полного цикла, WAAS/EGNOS	СКО в плане 5 м+0,5мм/км СКО по высоте 5 мм +1 мм/км	
Trimble R7	Многочастотный (поддержка GPS и ГЛОНАСС)	72 канала: - GPS сигналы: L1 C/A код, L2C, полный цикл фазы несущих L1/L2/L51 - ГЛОНАСС сигналы: L1 C/A код, L1 P код, L2 P код	в плане ±5 мм +0,5 мм/км СКО; по высоте ±5 мм+1 мм/км СКО;	

Технические характеристики GPS оборудования –
GPS антенны

Спутниковые GPS Антенны			
Название модели GPS антенны	Стабильность фазового центра	Дополнительные параметры	Фотография
Zephyr	Не менее 1 мм в плане	Отражатель Trimble Stealth – для уменьшения многолучевости Частоты: L1/L2/L5/G1/G2/ OmniSTAR/SBAS/E1/E2/E5ab/E6	
Zephyr Geodetic	Не менее 1 мм в плане	Отражатель Trimble Stealth – для уменьшения многолучевости, принимаемые сигналы L1/L2/L5/SBAS	
Topcon CR3 GGD w/Radome	менее 1 мм в плане	Принимаемые сигналы: GPS L1, L2, L5; ГЛОНАСС L1, L2, L3; Galileo E1, E2, E5, E6;	
JPS Regant w/Dual Depth Choke, Ext (DDE)	менее 1 мм в плане	Принимаемые сигналы: GPS L1, L2, L5; ГЛОНАСС L1, L2, L3; Galileo E1, E2, E5, E6;	
Trimble GNSS Choke Ring	менее 1 мм в плане	Принимаемые сигналы: GPS L1, L2, L5; ГЛОНАСС L1, L2, L3; Galileo E1, E2, E5, E6; WAAS, EGNOS, QZSS, Gagan, MSAS, OmniStar	

6.4. Обработка данных GPS-измерений

Камеральная обработка полевых GPS-измерений проводится с использованием специализированных пакетов фирменного программного обеспечения (например Trimble Geomatics Office (TGO)), поставляемых с GPS приемниками фирмы, методом расчета всех векторов с уравниванием.

Полевая обработка выполняется от каждого из базовых пунктов двумя способами: одиночными векторами и совместной обработкой всех векторов с уравниванием. Проанализировав на перекрытиях расстановок расхождения координат от разных баз, выбирается лучший способ и дальше обработка ведется этим способом. В каждой сессии вычисляются новые координаты базового пункта от пункта с закрепленными координатами. После завершения всех измерений и получения урванных координат этой базы в координаты рядовых точек, вычисленные от этой базы, вводятся уточняющие поправки.

Качество измерений оценивается по трем параметрам: разброс координат по базовым векторам в разных сессиях; расхождения на точках перекрытия сессий; разница координат, полученных от разных баз. Среднеквадратические ошибки не должны превышать в плане ± 3 мм, по высоте ± 5 мм.

Ввиду того, что могут использоваться разные виды GPS оборудования при выполнении сессий GPS наблюдений, перед импортированием полученных данных в программное обеспечение (ПО) для выполнения постобработки производится конвертирование данных полученных в результате наблюдений (например, в формат RINEX). Приложение для конвертирования файлов RINEX показано на рис. 37.



Рис. 37. Приложение для конвертирования файлов RINEX

Далее, файлы GPS данных, полученных в результате конвертирования, импортируются в программное обеспечение Trimble Geomatics Office, предназначенное для выполнения дальнейшей обработки и уравнивания.

При выполнении импорта файлов для дальнейшей обработки, необходимо уделить особое внимание при вводе типа антенны, высоты антенны и способа измерения высоты антенны, окно ввода данных показано на рис. 38.

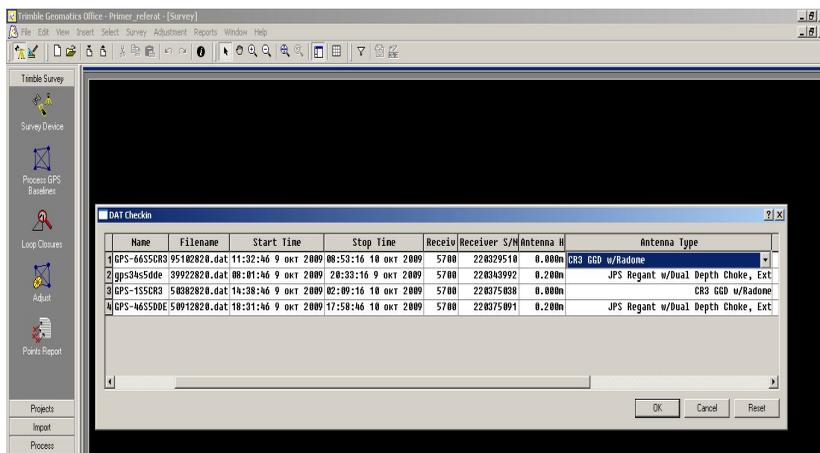


Рис. 38. Окно ввода данных при импортировании файлов сырых данных в TGO

После выполнения операции импорта, необходимо выполнение просчета векторов базисных линий, но перед этим надо выполнить действия, в результате которых будут исключены плохие данные наблюдений.

Наиболее лучших результатов можно достичь при показаниях $PDOP \leq 4$, при $5 \leq PDOP \leq 7$ – результаты приемлемы, при $PDOP \geq 7$ измерения не приемлемы для достижения необходимой точности.

По графику PDOP показанному на рис. 39 видно, что качество информации накопленной GPS станцией приемлемо, но в период времени с 5:50 до 6:50 ошибка PDOP резко поднялась, значит, данный период записи надо исключить из процесса обработки.

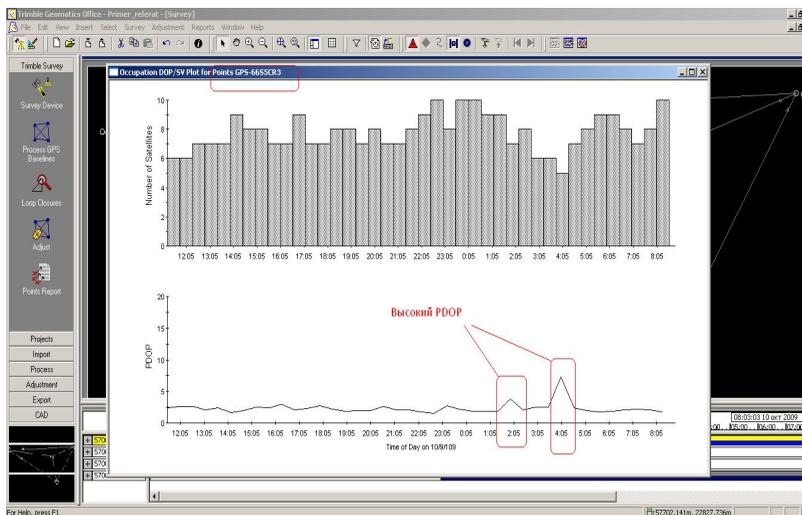


Рис. 39. Информация о качестве собранной информации

Далее выполняется просчет векторов базисных линий.

Результат просчитывания базисных линий (векторов), можно оценить по следующим параметрам:

- тип решения – должен быть fixed (фиксированный), при значении float (плавающий) – необходимо продолжить зачистку плохих сигналов;

- отношения – индикатор качества GPS, значение должно быть большим;

- относительная дисперсия – безмерная величина, показывающая, насколько ошибка полученная в результате наблюдений соответствует ожидаемой. Значение должно быть максимально приближено к 1;

- СКО – показатель разброса отдельных решений каждого цикла измерений. Значения СКО представляют собой величину шума в решении, и позволяют оценивать качество базисной линии.

После того, как будет выполнен просчет базисов, выделяется вектор и запрашивается отчет о базисной линии.

«Графики невязок», показанные на рисунке 39, характеризуют качество данных получаемых от спутника и используются для представления величины шума в решении. На них показаны

невязки для каждого спутника по каждому циклу измерений. Зашумленные спутники могут повлиять на качество данных получаемых с других спутников. Отметки «крестики» на графике должны группироваться вокруг нулевого значения. По отклонению от нулевого значения определяется величина зашумленности сигнала спутника. Используя информацию, отраженную в данных графиках, производится повторная зачистка временного сигнала в соответствии с рис. 40, после чего производится повторный пересчет базисных линий.

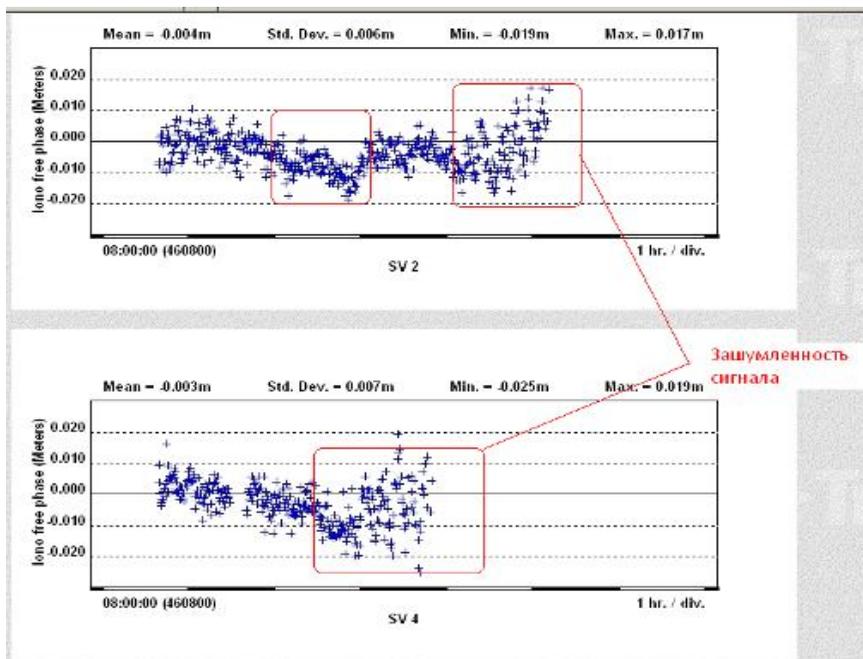


Рис. 40. Графическое изображение определения местоположения

После того, как будут получены результаты, удовлетворяющие требованиям, описанным выше, можно приступать к уравниванию сети.

Уравнивание всей сети осуществляется в следующей последовательности:

– фиксируется одна базовая станция и производится уравнивание;

– производится анализ отчета результатов уравнивания. В случае получения положительных результатов, выполняется уравнивание сети при двух закрепленных базовых пунктах и т. д., в зависимости от технического задания и количества данных в задании фиксированных пунктов.

После выполнения уравнивания сети, задается запрос на получение каталога координат и высот пунктов, полученных в результате процесса обработки.

Оценка качества GPS-измерений показана в табл. 27.

Таблица 27
Оценка качества результатов GPS-измерений

Сессии				ПЕРЕКРЫТИЯ (Ср. значение)				Отклонения от среднего, мм		
№	X	Y	H	№	X	Y	H	dX	dY	dH
Сессия 1										
8	2491,107	4401,076	-23,285	8	2491,106	4401,074	-23,2795	-1,9	-1,3	5,6
9	0936,812	0153,611	-23,876	9	0936,812	0153,611	-23,8724	-0,7	0,2	3,2
Сессия 2										
8	2491,105	4401,074	-23,278	8	2491,106	4401,074	-23,2795	0,1	0,7	-1,6
9	0936,813	0153,613	-23,871	9	0936,812	0153,611	-23,8724	-1,1	-1,5	-1,8
Сессия 3										
8	2491,105	4401,075	-23,275	8	2491,106	4401,074	-23,2795	0,4	-0,3	-4,5
9	0936,812	0153,610	-23,872	9	0936,812	0153,611	-23,8724	0,2	1,7	-0,4
Сессия 4										
8	2491,105	4401,073	-23,280	8	2491,106	4401,074	-23,2795	1,4	0,9	0,5
9	0936,810	0153,612	-23,872	9	0936,812	0153,611	-23,8724	1,5	-0,4	-0,9
$n=4$ $m=8$ Сумма квадратов отклонений Среднеквадратическая ошибка един. измерения								План		Высота

По изменению пространственных координат реперов наблюдательной станции вычисляются полные вектора сдвижения точек земной поверхности (рис. 41). По величине и направлению действия векторов смещения реперов определяются скоро-

сти сдвижения земной поверхности. Путем специального анализа векторной картины поля сдвижений делаются первоначальные выводы о наличии на исследуемом участке структурных нарушений и их активности.

Путем специального анализа полученной картины распределения деформаций по исследуемому участку выявляются основные закономерности деформационного процесса, выделяются участки с аномальными значениями поля деформаций, на которых в дальнейшем сгущается сеть наблюдательной станции, делаются прогнозные оценки о развитии деформационной обстановки на различные промежутки времени.

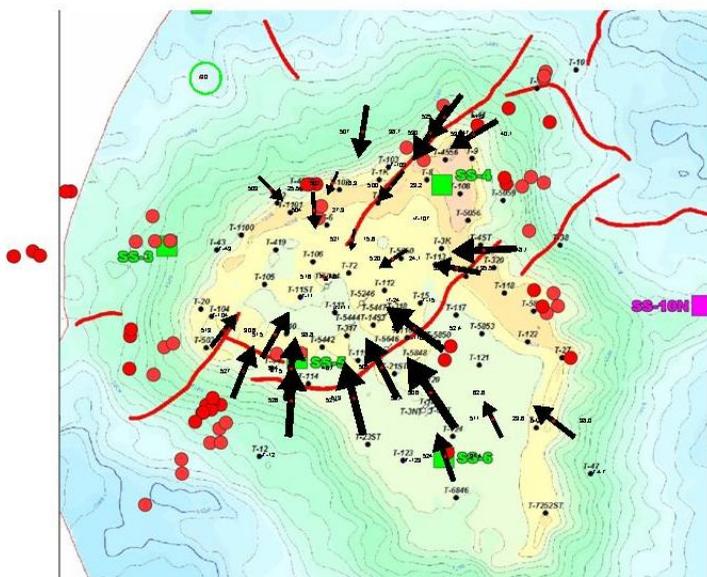


Рис. 41. Схема направлений горизонтальных движений GPS-пунктов на территории месторождения

Применение современных методов спутниковой геодезии для наблюдений за горизонтальными и вертикальными деформациями земной поверхности на территории геодинамических полигонов, позволит проводить данные исследования на качественно более высоком уровне.

6.5. Повторное высокоточное нивелирование на техногенных ГДП

Целью повторного высокоточного нивелирования на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений является контроль за возникновением и развитием современных деформационных процессов природного и техногенного генезиса в форме вертикальной компоненты движений и деформаций земной с точностью не более ± 1 мм/км. Повторные наблюдения позволят осуществить контроль за современной активностью разломов и трассирование активных разломов на территории месторождения. По результатам повторного нивелирования оцениваются тенденции возможных просадок земной поверхности за счет отбора жидкости и падения пластового давления, а также уровень современных аномальных напряжений в разломных зонах для локализации участков с аномальным развитием современных деформаций. Слежение за деформациями в пределах локальных участков месторождений с повышенной пространственной деятельностью наблюдений позволит осуществить контроль за процессами в потенциальных зонах, в окрестностях эксплуатационных скважин, в районах обустройства месторождения и инфраструктуры, а также на участках повышенного экологического риска. Результаты деформационного мониторинга используются также для выделения участков повышенного геодинамического риска.

При организации геодинамических полигонов с целью обеспечения своевременного получения информации о развитии геодинамических процессов на месторождении необходимо соблюдать следующие требования:

- 1) начинать исследования следует как можно раньше, на начальной стадии разработки;
- 2) территория месторождения должна иметь хорошую изученность геологического строения;
- 3) предпочтения для исследований отдаются месторождениям, обладающим мощными нефте-, газо-, водоносными горизонтами, определяющими длительный период разработки;

4) месторождение должно быть обособлено от смежных эксплуатируемых месторождений и расположено от них на расстоянии не менее 10–15 км с тем, чтобы периферийные опорные геодезические знаки полигона не подвергались влиянию разработок смежных месторождений;

5) необходимо учитывать технологическую схему разработки месторождения с поддержанием пластового давления или применением тепловых методов;

6) месторождение должно находиться в состоянии интенсивной эксплуатации;

7) территория месторождения по возможности должна отвечать условиям удобства размещения нивелирных пунктов и выполнения высокоточного нивелирования;

8) при отборе нефти без закачки воды в разрабатываемый горизонт в результате эксплуатации месторождения происходит уплотнение пород коллекторов, что вызывает оседание земной поверхности в пределах территории месторождения. В случае закачки воды в пласт естественное напряженно-деформационное состояние может измениться. Все эти процессы и явления должны учитываться при организации геодинамических наблюдений;

9) выбор объекта для прогноза геодинамического состояния территорий нефтегазовых месторождений должен производиться при непосредственном участии представителей недропользователя.

Проектируемые линии высокоточного нивелирования на месторождении прокладываются в виде сетей, пересекающих месторождение и образующих в пределах его границ несколько профильных линий, опирающихся на опорные реперы, закладываемые вне зоны действия техногенных процессов. В неблагоприятных для нивелирования условиях местности нивелирные сети могут строиться в виде 3–4 радиально расположенных ходов, прокладываемых от общего репера, расположенного в центре месторождения, и выходящих своими концами за пределы зоны влияния техногенных процессов.

При вытянутой форме месторождения полигон может состоять из нивелирных линий, проходящих вдоль продольной оси месторождения, и нескольких поперечных, секущих примерно под прямым углом продольную линию через 5–10 км.

В целях получения более полной картины смещения земной поверхности в пределах месторождения от основных ходов полигона прокладываются ходы небольшой протяженности к участкам интенсивного отбора жидкости из недр, к местам расположения эксплуатируемых и бездействующих скважин [52].

Сети нивелирных линий развиваются в виде системы пересекающихся профилей, проходящих вдоль продольной оси месторождения, и нескольких поперечных, пример размещения нивелирных пунктов и линий на территории месторождения нефти показан на рис. 42.

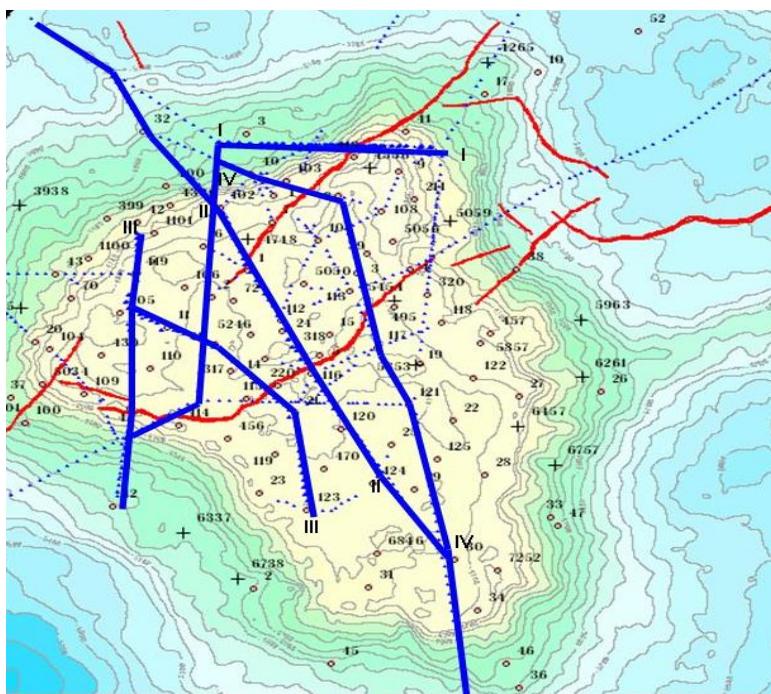


Рис. 42. Пример размещения нивелирных пунктов и линий на территории месторождения нефти

На концах всех этих линий закладываются опорные реперы. Пункты нивелирования размещаются вдоль запланирован-

ных профилей в среднем на расстоянии 500 м друг от друга. Все неработающие скважины, находящиеся на расстоянии 500–1000 м от линии высокоточного нивелирования, должны включаться в ходовые линии. Для каждого месторождения необходимо заложить несколько опорных пунктов, относительно которых должны фиксироваться изучаемые деформации. К таким пунктам предъявляются повышенные требования в отношении неизменности их положения в течение всего периода эксплуатации месторождения. Они также должны располагаться на наиболее стабильных участках местности.

Минимальное расстояние между границей месторождения и опорным репером, закладываемых вне зоны действия техногенных процессов и считающимися неподвижными, следует принимать равным одной–двум глубинам нижнего эксплуатируемого горизонта.

При приближении к прогнозируемым по промыслово-геологической информации тектоническим нарушениям, расстояние между нивелирными пунктами следует уменьшить в среднем до 200 м. Причем, на каждой стороне тектонического нарушения должно быть заложено не менее двух нивелирных знаков. Между опорными пунктами, расположенными за пределами границы месторождения, производится высокоточное нивелирование с привязкой к пунктам государственной нивелирной сети для получения высот в единой системе. Повторное высокоточное нивелирование между опорными пунктами проводится не реже, чем один раз в год. Точность проектируемых работ: среднеквадратическая случайная ошибка нивелирования – $\pm 0,9$ – $1,1$ мм/км.

Конструкция реперов и глубина их заложения определяются исходя из геолого-климатических условий района. При этом необходимо обеспечить длительную сохранность нивелирных реперов и обеспечить отсутствие антропогенных воздействий. В целях уменьшения коррозии металлических частей реперов, следует применять оцинкованные и эмалированные трубы. В случае их отсутствия, на металлические трубы наносят антикоррозийное покрытие.

Грунтовые реперы в области сезонного промерзания, как правило, закладываются ниже глубины промерзания.

Наружным оформлением грунтового репера является канава и опознавательный столб в виде железобетонного пилона с плитой, устанавливаемого в 80 см от репера. К опознавательному столбу надежно прикрепляют охранную пластину, обращенную в сторону репера, надпись отливают или штампуют. Типовой внешний вид нивелирного пункта показан на рис. 43.



Рис. 43. Нивелирный пункт

Работы по повторному нивелированию на техногенных геодинамических полигонах являются частью комплекса исследований, выполняемых с целью изучения современных движений земной коры, поиска предвестников землетрясений, выявления активных глубинных разломов и мелких поверхностных разрывов, наиболее активных участков и тектонического строения земной коры, а также деформаций земной поверхности, вызванных техногенными процессами.

Высотные построения на геодинамических полигонах делятся:

- на локальные (приуроченные к активным глубинным разломам и разрывам земной коры);
- на площадные (охватывающие районы возможных эпицентров разрушительных землетрясений, крупные населенные пункты и районы эксплуатируемых и строящихся гидростанций);
- на региональные (связывающие крупные геологические структуры).

Эти построения создаются с целью выявления движений геологических структур относительно друг друга.

Пункты высотных сетей на локальных и площадных построениях по возможности совмещают с пунктами плановой сети.

Плотность нивелирной сети на полигонах при локальных и площадных построениях должна быть такой, чтобы можно было надежно выявить участки земной поверхности, имеющие различные скорости движений.

Для наблюдений за устойчивостью знаков на каждом геодинамическом (техногенном) полигоне вблизи одной из скважин создают специальную площадку. На этой площадке на расстоянии 30–70 м от скважины закладывают все типы реперов и центров, применяемых на данном полигоне. Ежегодно два раза в год (зимой и летом) нивелируют все знаки на площадке и сопоставляют превышения, полученные при первом и последующем нивелированиях. Типы знаков, явно не устойчивые, исключаются из дальнейших нивелирований сети геодинамического полигона.

За первые 3–5 лет все линии на локальных и площадных строениях нивелируют три раза. В последующие годы сроки и объемы повторных нивелирований устанавливают исходя из обнаруженных скоростей вертикальных движений отдельных блоков земной поверхности.

При выполнении повторного нивелирования необходимо стремиться к тому, чтобы трассы линий, приборы, места постановки нивелира и переходных точек в каждом цикле измерений совпадали или были очень близкими.

Нивелирные линии I и II классов должны пересекать предполагаемые линии разломов, разрывов и блоков. По возможности следует совмещать линии повторного нивелирования на

геодинамических полигонах с ранее проложенными линиями, хотя бы даже с линиями низших классов.

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 VAR-кодом можно применять следующую программу наблюдений на станции (табл. 28).

Таблица 28
Последовательность наблюдений на станции

Станция	Прямой ход	Обратный ход
Нечетная	Z_K, P_K, P'_K, Z'_K	P_K, Z_K, Z'_K, P'_K
Четная	P_K, Z_K, Z'_K, P'_K	Z_K, P_K, P'_K, Z'_K
Примечание: Z_K, P_K – отсчеты по задней и передней рейкам; Z'_K, P'_K – 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.

Точность получения скоростей СВДЗП на геодинимических полигонах регламентируется неравенством

$$v_0 = \frac{\Delta h}{t} \geq m_u \times 2p_\beta, \quad (69)$$

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 $P=3$ – нормированный коэффициент при вероятности $\beta = 97\%$.

Тогда предельное значение погрешности измерения скоростей СВДЗП определяется выражением

$$m_{u_{пред.}} \leq 17 \times 10^{-2} v_0. \quad (61)$$

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

$$m_u = M \frac{\sqrt{2L}}{t}, \quad (62)$$

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

6.6. Техногенные полигоны гидроэлектростанций и атомных станций

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

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» [53, 54, 56].

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 водохранилища 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.

Рекомендуемая схема геодезических построений на ГДП ГЭС показана на рис. 44.

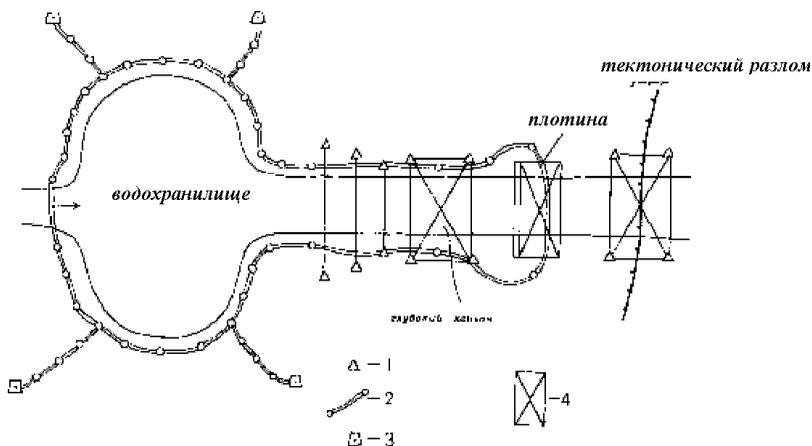


Рис. 44. Схема геодезических построений на ГДП ГЭС:
 1 – пункты плановой сети; 2 – линии нивелирования I класса;
 3 – нивелирные пункты, расположенные вне зоны влияния водохранилища; 4 – плотина ГЭС

Требуемая и реально возможная точность линейных измерений на ГДП ГЭС ± 5 мм, угловых $0,3''$, нивелирования $0,3$ мм/км. Очередные циклы измерений рекомендуется планировать следующим образом: 2 цикла до заполнения, ежегодно во время заполнения и первые пять лет после заполнения водохранилища. Необходимость дальнейшего продолжения наблюдений решается компетентной комиссией, на основе полученных результатов

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

Атомные электростанции (АЭС) представляют собой сложные инженерные сооружения, которые состоят из ядерного реактора и комплекса устройств, обеспечивающих безопасное производство электрической энергии. Здания, сооружения и основное оборудование современных атомных электростанций относятся к уникальным не только по сложности применяемых конструктивных решений, но и по условиям возведения и экс-

плуатации. Для них характерны требования высокой прочности, устойчивости, надежности и долговечности. Так предельно допустимый крен оснований зданий и сооружений АЭС составляет $1 \cdot 10^{-4}$ за 30 лет или $3,3 \cdot 10^{-6}$ в год.

Поэтому строительству АЭС предшествует период исследований различных естественных факторов, влияющих на ее устойчивость. Эти исследования включают специальные геолого-геоморфологические, сейсмологические, геофизические и геодезические работы по выявлению тектонически-активных структур, возможных тектонических нарушений и получению количественных характеристик деформаций на этих структурах. В комплексе результаты всех перечисленных исследований позволяют дать обоснованное заключение о сеймотектонических условиях и устойчивости земной поверхности в районе АЭС, а также выбрать стабильную *площадку строительства* размером 3x3 км, на которой будут располагаться основные объекты АЭС.

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 [56, 57].

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 АЭС, проводят высокоточные геодезические исследования СДЗП и ее приповерхностных слоев на глубинах заложения фундамента сооружений. Они служат для количественной оценки геодинамических условий района размещения АЭС и обоснования ее безопасности.

При постановке геодезических работ следует учитывать, что изыскания для выбора местоположения АЭС ведутся в течение 4–5 лет по следующим трем последовательным этапам:

- изучение района строительства АЭС, который охватывает территорию радиусом 100–200 км;

- изучение одного или нескольких локальных участков в пределах района строительства, называемых пунктами строительства, имеющих размеры 10х15 км.

- изучение в пределах намеченного пункта строительства одной или нескольких площадок строительства размером 3х3 км, на которой должны располагаться основные объекты атомной электростанции.

В целом же перечисленные объекты, т. е. район строительства, пункты и площадки строительства образуют ГДП АЭС. Геодезические исследования по каждому этапу работ на полигоне АЭС имеют свои особенности. Рассмотрим их состав, схемы построений и методы измерений отдельно для района, пунктов и площадок строительства АЭС.

Комплекс работ, выполняемых для изучения деформаций на полигонах АЭС, включает:

- геодезическое изучение района строительства АЭС;
- составление технических проектов геодезических работ на выбранные пункты и площадки строительства АЭС;
- непосредственное выполнение и обработку запроектированных геодезических измерений;
- подготовку и представление соответствующей отчетной документации.

Геодезическое изучение района строительства АЭС выполняется без постановки специальных измерений, с использованием только тех геодезических и космических фотосъемочных данных, которые уже имеются на исследуемый район.

По фотоснимкам осуществляется дешифрирование геотектонических структур и составляется схема тектонических нарушений. Требуемая геодезическая информация для района строительства АЭС состоит из схемы расположения линий повторного нивелирования в масштабе 1:500000, графиков накопления разностей превышений на эти линии и фрагмента карты современных вертикальных движений земной коры масштаба 1:2500000.

Для выбора наиболее устойчивых зон под площадки строительства изучаются вертикальные движения. Наблюдения ведутся не менее 3 лет и включают 5–6 циклов повторных измерений.

Основным методом изучения современных движений земной поверхности на пунктах строительства АЭС является высокоточное повторное нивелирование. При этом с учётом сравнительно короткого интервала времени, на котором ведётся изучение деформационных процессов, необходимо выполнять нивелирование I класса.

Исследование горизонтальных движений земной поверхности предусматривается лишь в особых случаях, указанных Заказчиком в техническом задании. Измерения углов и сторон в плановых геодезических построениях выполняется по программе триангуляции (трилатерации) I класса.

Схемы нивелирных сетей выбираются в зависимости от условий местности и расположения разломов, но, как правило, должны включать замкнутый ход, расположенный вдоль границы участка. Указанный полигон пересекается двумя–тремя линиями, проходящими вкрест потенциально активным разломам. Периметры образованных замкнутых полигонов не должны превышать 40 км. Расстояние между смежными реперами должно составлять в среднем 1–1,5 км.

Для изучения горизонтальных деформаций используются локальные плановые построения. Если изучаются движения по одному направлению, например, вкрест тектонического разлома, то используются схемы в виде отдельных створных линий, образованных в зависимости от поставленной задачи двумя или несколькими пунктами.

Если интерес представляют две компоненты векторов плановых смещений, то используются построения в виде:

– вытянутых геодезических четырёхугольников, в которых пара коротких сторон расположена по одному исследуемому направлению, а одна из диагоналей – по другому;

– либо двух- или многолучевых систем, т. е. линий, измеряемых с одной общей точки по двум или нескольким направлениям;

– иные построения. Длины измеряемых линий в таких построениях не должны превышать 3–4 км.

В пределах района строительства обычно выбираются два альтернативных площадки строительства АЭС, на которых выполняются комплексные исследования.

Геодезические работы на пунктах строительства ведутся не менее трех лет и включают 5–6 циклов повторных линейных и нивелирных измерений. Схемы нивелирных построений пунктов строительства АЭС выбирают в зависимости от расположения разломов и условий местности. Требуемая точность нивелирования 0,3 мм/км, что может быть достигнуто по методике нивелирования I класса повышенной точности. Схема нивелирных построений на пункте строительства АЭС представлена на рис. 45.

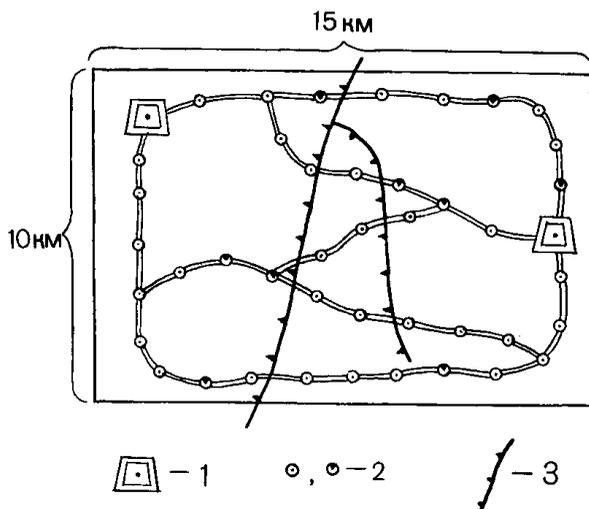


Рис. 45. Схема нивелирования на пункте строительства АЭС:
 1 – глубинные реперы; 2 – грунтовые и скальные нивелирные знаки;
 3 – тектонические нарушения

В пределах площадки строительства АЭС исследованию подлежат только вертикальные деформации земной поверхности, для чего на территории таких площадок развивается сеть нивелирования II класса.

Схема высотной сети выбирается в виде равномерной сети нивелирных ходов, прокладываемых на расстоянии 0,6–0,7 км друг от друга параллельно границам площадки строительства АЭС, при этом крайние ходы должны располагаться на расстоянии 0,4–0,5 км от границы. Расстояние между смежными реперами должно составлять в среднем 0,3 км. Указанная схема достаточно хорошо контролирует устойчивость всей территории площадки (рис.46).

Пункты плановой сети по возможности должны быть совмещены с пунктами нивелирной сети.

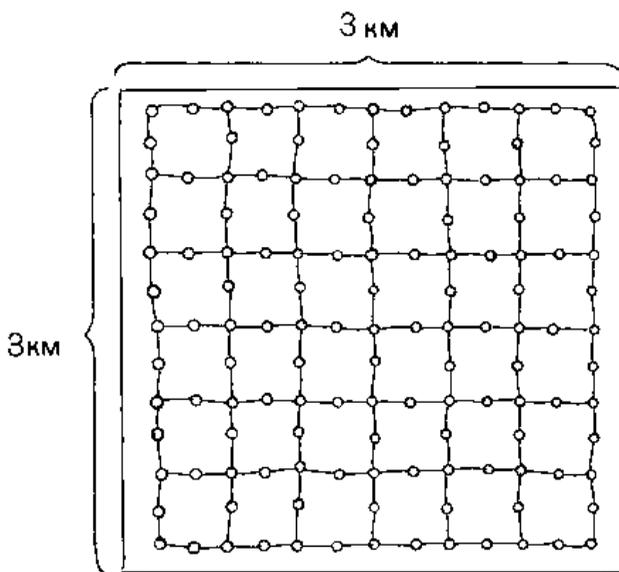


Рис. 46. Схема высотной сети на площадке строительства АЭС

Для изучения горизонтальных деформаций используются локальные плановые построения, вид которых показан на рис. 47.

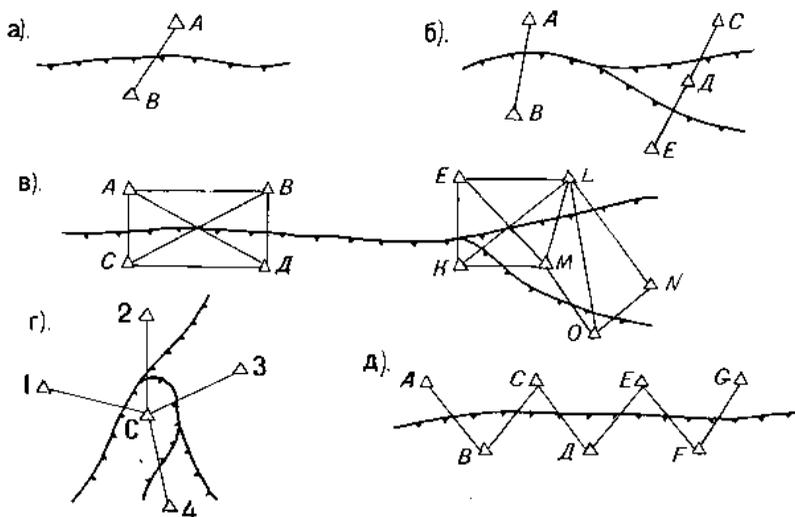


Рис. 47. Схема плановых построений на пунктах строительства АЭС:
 а – отдельная линия, секущая разлом; б – отдельная и створные линии;
 в – геодезические четырехугольники (отдельные и спаренные);
 г – многолучевые системы (центральная обсерватория);
 АС – центральный пункт, на котором устанавливается
 светодальномер; Д1, Д2, Д3, Д4 – отражательные станции;
 д – светодальномерный траверс

На практике все перечисленные виды плановых построений могут использоваться в сочетании друг с другом.

Задача геодезических работ на геодинамических полигонах атомных станций заключается в том, чтобы на основании повторных измерений определить численные характеристики контрастных вертикальных, а в некоторых случаях и горизонтальных) движений земной поверхности, которые в сочетании с другими данными позволяют составить обоснованное заключение о сейсмических и тектонических условиях, а также об устойчивости земной поверхности в районе расположения АЭС.

Обработка геодезических измерений на полигонах АЭС включает два этапа. На первом этапе выполняется обработка измерений и подготовка соответствующих полевых и отчётных

документов. В результате обработки для плановых сетей получают измеренные и уравненные на станции линии и углы, а также таблицы разностей соответствующих измеренных элементов. Из обработки нивелирных данных получают неуравненные величины превышений между реперами, ведомости сопоставления результатов нивелирования разных циклов и графики накопления разностей превышений относительно I цикла. Такая обработка выполняется по завершению каждого цикла измерений. На втором этапе обработки определяются численные характеристики вертикальных и горизонтальных движений.

При обработке повторного нивелирования на пунктах и площадках строительства АЭС используется методика совместного определения скоростей движения и высот реперов по данным всех выполненных циклов измерений, которая позволяет определять как долго-, так и короткопериодические компоненты вертикальных движений.

В связи с тем, что на полигонах АЭС используются максимально упрощенные схемы плановых построений (двух- и многолучевые системы, створные линии), обработка выполненных на них повторных измерений, как правило, сводится к сопоставлению непосредственно измеренных линейных элементов и вычислению компонентов векторов смещений по соответствующим направлениям.

В случаях, когда плановые построения имеют вид геодезических четырёхугольников с измеренными сторонами и углами, обработка каждого отдельного цикла выполняется по обычной схеме уравнивания линейно-угловых или линейных сетей в условной системе координат. В качестве исходной стороны выбирается одна из сторон (или диагоналей) четырёхугольника. По вычисленным разностям координат между отдельными циклами строят схему векторов, которые описывают относительные смещения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: Монография в 2 томах. Т.1 – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с.

2. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: Монография в 2 томах. Т.2 – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 360 с.

3. Постановление Правительства Республики Казахстан от 31. 12. 2003 г. № 1383 «Программа развития государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на 2004 – 2010 годы».

4. Машимов М.М. Геодинамика: современные проблемы и перспективы // Геодезия и картография. –М.: Недра, 1995. –С. 20–24.

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

6. 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.

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

8. Земцова А.В. Высшая геодезия (геодезические работы на геодинамических полигонах): Учеб. пособие. – Алматы: КазНТУ, 2008.–107 с.

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

10. Высокочил 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.

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

12. *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.

13. *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.

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., Байгурин Ж.Д.* О развитии геодезических работ на геодинамических прогностических полигонах в Республике Казахстан //Сборник материалов. Пленарное заседание. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 243 с.

16. *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.

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

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

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

20. *Яценко 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.

21. *Земцова А.В.* Измерение горизонтальных углов и направлений: Метод. указания. –Алматы: КазНТУ, 2005. –15 с.

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

23. *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.

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

25. *Машимов М.М.* Уравнивание геодезических сетей. –М.: Недра, 1979. –367 с.

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

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

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

29. Инструкция по вычислению нивелировок. –М.: Недра, 1971.

30. *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.

31. *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.

32. *Уставич Г.А.* О совершенствовании технологий нивелирования // *Геодезия и картография*. 2005. № 3. –С. 11–13.

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

34. *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.

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

36. Указания по вычислению скоростей современных вертикальных движений земной поверхности по материалам повторного нивелирования. –М.: ОНТИ ЦНИИГАиК. 1974.

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

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

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

40. *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.

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

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

43. Руководящий технический материал по проведению геодезических работ при изучении влияния техногенных процессов на деформацию земной поверхности. –М.: ОНТИ ЦНИИ-ГАиК, 1978.

44. *Нусинов Е.* Геодезическая безопасность освоения месторождений углеводородов Казахстана: Основные положения. //Наука и высшая школа Казахстана 2004. –С. 1–3.

45. *Передера В.С., Земцова А.В., Байгурин Ж.Д.* Геодинамическая безопасность освоения месторождений углеводородов Казахстана //Мат. междуна. конф. «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых ученых». –М.: 2005.

46. Закон о недрах и недропользовании. Статья 56 «Государственный мониторинг недр».

47. «Положение о Государственном мониторинге недр РК» № 106 от 27.01.1997.

48. Проект Методического руководства по проведению геодинамического мониторинга на месторождениях углеводородов Республики Казахстан. –Астана: Комитет геологии и недропользования МЭМР РК, 2009.

49. Методическое руководство (регламент) по созданию комплексных геодинамических полигонов и проведению многофункционального мониторинга природно-техногенных сейсмодинамических и флюидодинамических процессов при освоении углеводородного потенциала недр республики Казахстан».

50. Методическое руководство по ведению мониторинга современных движений высокоточными спутниковыми GPS-наблюдениями для прогноза геодинамического состояния территорий и нефтегазовых месторождений.

51. *Панжин А.А.* Результаты наблюдений за деформациями породных массивов методами спутниковой геодезии //Сб. тр. Междуна. конф. "Геодинамика и напряженное состояние недр Земли". –Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001.

52. <http://www.geo-nivelir.ru/default.aspx?textpage=14>.

53. *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.

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

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

56. *Лопанчук А.А.* Изучение СДЗК при размещении атомных станций //Геодезия и картография. 1991. № 10. –С.19–23.

57. Руководящий технический материал по изучению деформаций земной поверхности геодезическими методами на полигонах атомных электростанций. –М.: ЦНИИГАиК, 1984. –14 с.

58. *Кенбаев А.А., Земцова А.В., Байгурин Ж.Д.* Изучение современных горизонтальных движений земной поверхности на Шелекском геодинамическом полигоне // Мат. Междун. конф. «Инновационные технологии сбора и обработки геопространственных данных для управления природными ресурсами». – Усть-Каменогорск, 2010. –С. 131–137.

59. *Земцова А.В., Жантасова С.* Мониторинг с применением GPS на геодинамическом полигоне нефтегазового месторождения// Мат. Междун. конф. «Инновационные технологии сбора и обработки геопространственных данных для управления природными ресурсами». –Алматы, 2012. –С. 112–118.

60. *Angelina Zemtsova, Edege Omarov* From Geodesy and Mapping to Geospatial information // Proceedings of the International Workshop «Innovative Tecynologies of Efficient Geospatial Management of Earth Resources»/ –Almaty: KazNTU, 2012. –132 p.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Общие сведения о планете Земля.....	7
1.1 Сведения о фигуре Земли.....	7
1.2 Методы изучения фигуры и гравитационного поля Земли.....	17
1.3 Некоторые сведения о внутреннем строении Земли.....	30
1.4 Гравитационное поле Земли.....	34
1.5 Магнитное и электрическое поля Земли.....	42
1.6 Землетрясения.....	46
1.7 Тектоника литосферных плит.....	55
2 Геодинамические задачи геодезии.....	62
2.1 Классификация геодинамических явлений.....	62
2.2 Исследование глобальных и крупномасштабных геодинамических явлений.....	63
3 Методы изучения современных движений земной поверхности.....	71
3.1 Понятие о современных движениях земной поверхности.....	71
3.2 Общие сведения о методах изучения СДЗП.....	74
3.3 Геодезические методы изучения современных движений земной поверхности.....	80
4 Геодинамические полигоны.....	82
4.1 Классификация геодинамических полигонов.....	82
4.2 Прогностические геодинамические полигоны.....	84
4.2.1 Цели и назначение прогностических ГДП.....	84
4.2.2 Краткая характеристика прогностических геодинамических полигонов в Республике Казахстан...	87

4.2.3	Основные геодезические построения на прогностических геодинамических полигонах.....	93
4.2.3.1	Угловые и линейные измерения в геодезических сетях на геодинамических полигонах.....	93
4.2.3.2	Математическая обработка повторных наблюдений в плановых построениях на геодинамических полигонах.....	108
4.2.4	Основные высотные построения на прогностических ГДП.....	113
4.2.4.1	Методика выполнения нивелирования на ГДП.....	113
4.2.4.2	Обработка данных повторного нивелирования.....	129
5	Современные геодезические технологии изучения СДЗП.....	141
5.1	Определение СДЗП с использованием спутниковых навигационных систем.....	141
5.2	Общая структура и состав спутниковых навигационных систем.....	144
5.3	Планирование и выполнение GPS – измерений.....	150
6	Техногенные полигоны.....	158
6.1	Назначение техногенных полигонов.....	158
6.2	Комплексный геодинамический мониторинг и его исходные предпосылки.....	161
6.3	Высокоточные спутниковые наблюдения на техногенных ГДП.....	166
6.4	Обработка данных GPS-измерений.....	173
6.5	Повторное высокоточное нивелирование на техногенных ГДП.....	179
6.6	Техногенные полигоны гидроэлектростанций и атомных станций.....	187
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	197

Учебное издание

Земцова Ангелина Валентиновна

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Учебное пособие

Нач. РО ИИЦ
Редактор
Компьютерная верстка

*З. А. Губайдулина
Г. М. Дюсенбаева
Л. П. Умирбекова*

Подписано в печать 19. 05. 2014 г.
Тираж 300 экз. Формат 60x84 1/16. Бумага типогр. № 1.
Уч. изд. л.12,8. Усл. п. л. 11,9. Заказ № 40. Цена договорная

Издание Казахского национального технического
университета им. К.И. Сатпаева
Учебно-издательский центр КазНТУ
г. Алматы, Сатпаева, 22.

ISBN 978-601-228-633-5



9 786012 286335