



Назаров Александр Степанович, кандидат технических наук, доцент, почетный геодезист СНГ и автор более 90 работ в области математической обработки результатов геодезических и фотограмметрических измерений, автоматизации крупномасштабных топографических съемок и др.

В 1959 году окончил геодезическое отделение землеустроительного факультета Омского СХИ. Работал в качестве инженера-геодезиста Уральского предприятия «Сельхозаэрофотосъемка»; ассистента и доцента кафедры аэрофотогеодезии Омского СХИ; начальника ИВЦ, технологической лаборатории автоматизации топографо-геодезических работ и главного инженера Предприятия № 5 ГУГК СССР; начальника управления государственного градостроительного кадастра Министерства строительства и архитектуры Республики Беларусь; заместителя Генерального директора Национального кадастрового агентства Республики Беларусь.

Будучи доцентом Белгосуниверситета, читал курс фотограмметрии для студентов специальности «Географические информационные системы».

А.С. Назаров

Координатное обеспечение топографо- геодезических и земельно- кадастровых работ

ISBN 978-985-90035-9-2



9 789859 003592

А. С. Назаров

КООРДИНАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОПОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ И ЗЕМЕЛЬНО-КАДАСТРОВЫХ РАБОТ

*Учебный центр подготовки, повышения квалификации
и переподготовки кадров землеустроительной
и картографо-геодезической службы*

Минск
2008

Рецензенты

доктор технических наук, профессор Полоцкого
государственного университета *В.П. Подшивалов*
кандидат технических наук, профессор Белорусского
национального технического университета *М. С. Нестеренок*

Назаров, А. С.

Н19 Координатное обеспечение топографо-геодезических и земельно-кадастровых работ / А. С. Назаров. — Минск : Учеб. центр подгот., повышения квалификации и переподгот. кадров землеустроит. и картографо-геод. службы. 2008. — 83 с. : ил. ISBN 978-985-90035-9-2.

В работе рассмотрены планетарные и картографические координатные системы, используемые при выполнении топографо-геодезических и земельно-кадастровых работ на территории Республики Беларусь, а также способы их преобразований. Приведены краткие сведения о государственных геодезических сетях республики Беларусь и Российской Федерации, а также данные об имеющихся на рынке современных оптических и цифровых (электронных) геодезических приборах и их основные параметры. Значительное внимание уделено изложению методов спутниковых измерений и вопросам, связанным с установлением и восстановлением ключей связи местных систем координат и государственной. Предназначена для специалистов производства, занятым топографо-геодезическими и земельно-кадастровыми работами. Полезна студентам, обучающимся по специальностям «Геодезия», «Землеустройство», «Государственный земельный кадастр» и «Географические информационные системы».

УДК 528.4
ББК 26.12

ISBN 978-985-90035-9-2

© Назаров А. С., 2008
© Оформление Государственный комитет по
имуществу Республики Беларусь, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Деятельность современного геодезиста, землеустроителя или изыскателя неразрывно связана с использованием, а подчас и с выбором системы координат и высот, осуществляемом при планировании работ, камеральной обработке результатов геодезических измерений, создании топографического, кадастрового плана или землеустроительного проекта, при установлении границ земельного участка, формировании реестра земельных участков и иных объектов недвижимости и пр. Наиболее существенные последствия выбора системы координат возникают при создании местной системы координат, установлении, а иногда и восстановлении утраченных ключей ее связи с государственной.

Особую значимость вопросы выбора координатных систем, установления связи между ними и их взаимных преобразований приобретают при использовании современных информационных технологий, базирующихся на применении спутниковых измерений, материалов дистанционного зондирования, формировании баз данных и увязке результатов топографо-геодезических и земельно-кадастровых работ, выполненных в разное время цифровыми и электронными приборами. Такие приборы, оснащенные микропроцессорными устройствами и мощными средствами хранения данных, могут быть настроены на использование различных систем координат, проекций, моделей преобразований и др., и их эффективная эксплуатация требует адекватной подготовки специалиста.

Понятие «система координат» в геодезии и картографии относится к базовым и тесно переплетается с элементами математического описания планеты, такими как положение центра масс Земли, ось ее вращения, отвесная линия и некоторыми другими, относительно которых определяют положение начала системы координат, координатных линий и плоскостей. Поэтому в первой главе рассмотрены параметры эллипсоида и основные принципы его ориентации в теле Земли, системы эллипсоидальных и прямоугольных координат, используемых для определения положения точки на поверхности планеты и связи между ними, системы геодезических, нормальных, ортометрических высот и понятия о моделях геоида (квазигеоида).

Во второй главе рассмотрены так называемые картографические координатные системы, принятые для изображения поверхности планеты в той или иной проекции. При этом основное внимание уделено

классу конформных поперечно-цилиндрических проекций (Меркатора, Гаусса–Крюгера, UTM), а также систем государственных (СК-42, СК-95) и местных (в том числе СК-63) координат. Здесь же приведены опубликованные данные о деформации СК-42 на территории Республики Беларусь. Подробно описаны различные способы установления местных координатных систем и выбора параметров их связи с образующими системами, а также приведены общие сведения об установленных в республике местных координатных системах и краткий их анализ.

Третья глава носит справочный характер и содержит сведения о Государственных геодезических сетях Российской Федерации и Республики Беларусь (в том числе на застроенных территориях), характеристиках имеющегося на рынке геодезического оборудования: оптических и цифровых (электронных) теодолитов, нивелиров и тахеометров. Значительное место уделено изложению общих принципов спутникового позиционирования, структуре сигналов и использованию их для определения дальностей, методов и режимов измерений, функций аппаратуры пользователя и задач, решаемых спутниковыми приемниками. Все это способствует пониманию современных спутниковых технологий и факторов, определяющих условия эффективной эксплуатации соответствующих приборов.

Четвертая глава посвящена методам преобразования координатных систем и специфике использования для этой цели коммерческих программных продуктов. Значительное место здесь уделено способам восстановления ключей местных координатных систем по опорным точкам.

Представленный ниже материал ориентирован на специалистов, занимающихся геодезическими работами, обработкой результатов полевых измерений, либо изучающих соответствующие вопросы в рамках курсов высшей геодезии, космической геодезии, математической картографии или иных специальных дисциплин. Поэтому он не содержит доказательств, математических выкладок и иных элементов, а включает необходимый материал с достаточной полнотой, но в сжатой, «справочной» форме. При этом основное внимание сосредоточено на узловых вопросах, понятиях, математических моделях и иных элементах, необходимых для их грамотного использования при выполнении практических работ. Отбор этого материала выполнен с учетом необходимости понимания и осмысления содержания вычислительных операций, а форма его подачи учитывает предварительное с ним знакомство.

Глава 1

СИСТЕМЫ ПЛАНЕТАРНЫХ КООРДИНАТ

В настоящее время широкому кругу пользователей стали доступны не только программные продукты, оперирующие с самыми разнообразными координатными системами и проекциями, но и средства навигации, с помощью которых можно получить положение точек в различных системах. Потому рядовому пользователю сегодня приходится решать проблемы, с которыми ранее сталкивался сравнительно небольшой круг специалистов - с параметрами эллипсоидов, глобальными и локальными координатными системами, параметрами проекций, системами счета высот и многими, многими другими.

Геометрической основой этих координатных систем является земной **ЭЛЛИпсоид**.

§ 1 Земной эллипсоид и его параметры

Мысль о сферичности Земли была высказана еще в VI в. до н.э. древнегреческим ученым Пифагором, а доказал это и определил радиус Земли египетский математик и географ Эратосфен (III в. до н.э.). В конце XVII в. Ньютон на основе теории гидростатического равновесия доказал, что поверхность планеты сжата у полюсов, а ее экваториальная ось длиннее полярной.

Физическая поверхность Земли представляет собой сложное сочетание **ВОДНЫХ** пространств с большим числом гор, возвышенностей, равнин и низменностей (рис. 1.1, а). Для решения задач науки и практики требуется знать пространственное положение ее точек, определяя его относительно вспомогательной, математически определенной поверхности, достаточно близкой к реальной (физической) поверхности Земли. Такую поверхность называют *поверхностью относимости* за которую принимается *основная уровенная* поверхность Земли, в каждой точке которой нормаль совпадает с направлением отвесной линии (т.е. с направлением силы тяжести). Таковой является поверхность океанов и открытых морей, находящаяся в спокойном состоянии, мысленно продолженная под материками. Эту поверхность в 1873 г. немецкий физик И. Б. Листинг назвал *геоидом* (*землеподобным*) (рис. 1.1, б).

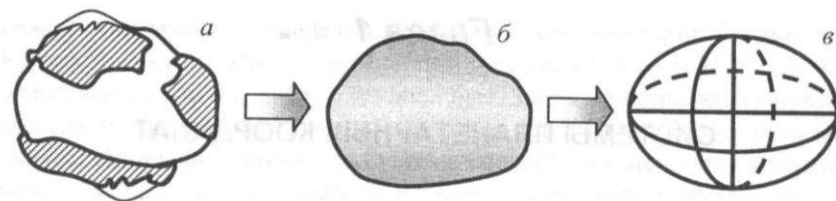


Рис. 1.1. Поверхность планеты (а), геоид (б) и эллипсоид вращения (в)

Фигура геоида чрезвычайно сложна, зависит от распределения масс внутри Земли и лучше всего характеризуется трехосным эллипсоидом с экваториальным сжатием 1 : 30 000, а долгота наибольшего меридиана, через который проходит большая ось экваториального эллипса, равна +15° [5]. По малости величины экваториального сжатия при геодезических вычислениях сложный трехосный эллипсоид заменяется более простым эллипсоидом вращения (рис. 1.1, в).

Сегодня для решения тех или иных практических задач находят применение модели:

- шарообразной Земли (при создании географических карт масштабов 1 : 1 000 000 и мельче);
- эллипсоида вращения вокруг его малой оси (при решении подавляющего большинства задач геодезии, картографии и др.);
- трехосного эллипсоида (при решении специальных задач).

К основным параметрам эллипсоида вращения относят большую (а), малую (b) полуоси, а также зависящие от них полярное сжатие (α), и квадраты первого (e) и второго (e') эксцентриситетов:

$$\alpha = \frac{a-b}{a}, \quad e^2 = \frac{aa^2 - b^2}{a^2}, \quad e'^2 = \frac{a^2a^2 - b^2}{b^2} \quad (1.1)$$

Форма эллипсоида (рис. 1.2) определяется значениями двух его параметров, один из которых является линейным (а или b), а второй - относительным. Обычно в качестве таковых принимают большую полуось а и полярное сжатие α.

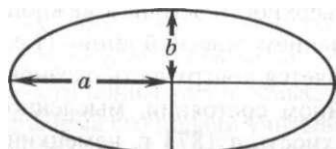


Рис. 1.2. Параметры эллипсоида

Малая полуось земного эллипсоида короче большой полуоси примерно на 21 км, поэтому приближенные значения характеристик его сжатия (1.1) равны

$$a \approx 1:300, \quad e \approx e' \approx 1:150.$$

Определение размеров земного эллипсоида и параметров его ориентация в теле Земли всегда рассматривались как основные задачи геодезической науки. Поэтому на протяжении столетий ученые пытались решить их на основе **градусных измерений**, позволяющих определить длины дуг меридианов и параллелей, а также координаты их конечных точек на основе высокоточных геодезических, астрономических и гравиметрических работ. Точность таких определений зависела от протяженности измеряемых дуг, их размещения на поверхности планеты, модели строения земной коры, точности измерений, метода математической обработки и др. С 1980-х годов указанные задачи решаются методами космической геодезии, для чего используют результаты многократных спутниковых измерений на пунктах высокоточной геодезической сети.

Параметры некоторых эллипсоидов, установленные на протяжении последних полутора сотен лет, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	Название эллипсоида	Год	Большая полуось а, м	Полярное сжатие α	Метод определения параметров эллипсоида
1	Бесселя	1841	6 377 397	1:299,15	Градусные измерения
2	Кларка	1880	6 378 249	1:293,47	
3	Гельмерта	1907	6 387 200	1:298,30	
4	Красовского	1940	6 378 245	1:298,30	
5	WGS-84	1984	6 378 137	1:298,257 224	Спутниковые измерения
6	ПЗ-90	1990	6 378 136	1:298,257 839	
7	ПЗ-90.02	2007	6 378 137	1:298,257 224	

Как следует из приведенных в табл. 1.1 данных, независимые определения параметров общеземного эллипсоида WGS-84 и ПЗ-90.02 полностью совпадают.

§ 2 Общеземные системы координат

Ось вращения планеты пересекает поверхность эллипсоида в точках северного (P) и южного (S) полюсов (рис. 1.3). Плоскость *BFEB*, проходящая через середину земной оси *PS* (т.е. на равных расстояниях от полюсов) и перпендикулярно к ней называется *плоскостью экватора*. Ее пересечение с эллипсоидом дает окружность большого круга, называемую *экватором*.

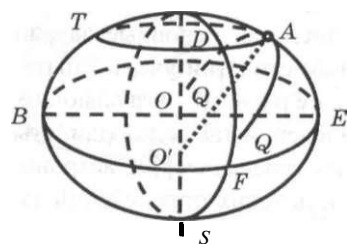


Рис. 1.3. Основные сечения эллипсоида вращения

Для определения положения произвольной точки земной поверхности используют системы эллипсоидальных (географических или геодезических) и пространственных прямоугольных (геоцентрических) координат.

Система *географических (астрономических) координат* (рис. 1.4, а) связана с отвесными линиями и определяет положение точки на поверхности эллипсоида двумя величинами: широтой (φ) и долготой (X). *Географической широтой* φ называют угол, образованный отвесной линией с плоскостью экватора; *географической долготой* X называют двугранный угол между плоскостью начального меридиана и меридиана, проходящего через данную точку.

Система *геодезических координат* (рис. 1.4, б) связана с нормалью к эллипсоиду и определяет положение точки пространства тремя величинами: геодезической широтой (B), геодезической долготой (L) и геодезической высотой (H). *Геодезической широтой* B называют угол между нормалью к поверхности эллипсоида в данной точке и плоскостью геодезического экватора. *Геодезической долготой* L называют двугранный угол между плоскостью начального геодезического меридиана и геодезического меридиана, проходящего через данную точку. *Геодезической высотой* H называют расстояние от данной точки физической поверхности Земли до поверхности эллипсоида по нормали к ней.

Все геодезические меридианы проходят через малую ось эллипсоида, совпадающую с осью его вращения.

Астрономические (географические) широты и долготы могут быть измерены с помощью соответствующих инструментов, в то время как геодезические могут быть найдены только по результатам вычислений.

Широты B и φ отсчитываются от экватора к полюсам, изменяются от 0 до 90° и считаются положительными для северного полушария (имеют обозначение с. ш.) и отрицательными для южного полушария (ю. ш.).

Сечения поверхности эллипсоида плоскостями, параллельными плоскости экватора, называются *параллелями* (например, $ADTA$). Сечения поверхности эллипсоида плоскостями, проходящими через точки полюса, называются *меридианами* ($PAESBTP$, $PDFSP$).

Таким образом, любой меридиан является геометрическим местом точек равных долгот, а параллель - геометрическим местом равных широт.

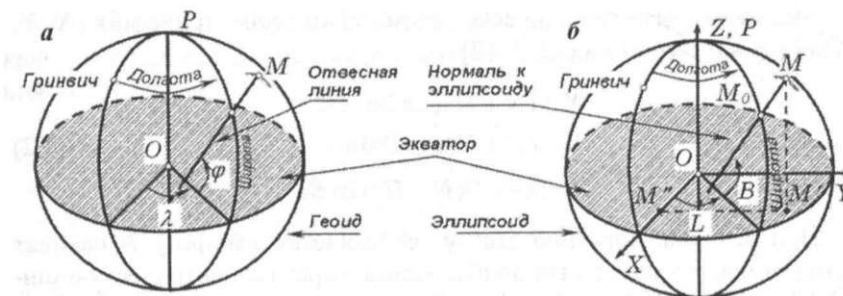


Рис. 1.4. Планетарные системы астрономических (а) и геодезических (б) координат

Долготы L и X изменяются от 0 до $\pm 180^\circ$ и отсчитываются от начального меридиана к востоку и западу. Восточные долготы (в. д.) считаются положительными, а западные (з. д.) - отрицательными.

Различия между геодезическими и астрономическими координатами объясняются несовпадением отвесных линий с нормальями к поверхностям эллипсоида. Среднее квадратическое значение этого различия для равнинных районов составляет около $5''$, для горных районов - $10-15''$ (где отдельные значения могут достигать $40''$). При мелкомасштабном картографировании указанными различиями пренебрегают.

Система геодезических координат используется при обработке обширных геодезических сетей, решения задач, связанных с передачей координат на значительные расстояния, изучении фигуры и размеров Земли, составлении топографических и географических карт. Эта система положена в основу разграфки листов топографических карт, рамками которых служат параллели и меридианы.

Наряду с системой геодезических координат, в качестве единой для всего эллипсоида широко используется система *прямоугольных пространственных координат* $OXYZ$ (рис. 1.4, б). Ее начало O совпадает с центром эллипсоида, ось OZ совпадает с его малой осью, ось OX совпадает с пересечением плоскостей геодезического меридиана и экватора, а ось OY дополняет систему до правой. В этой системе положение точки M характеризуется координатами

$$X = OM'', \quad Y = M'M''Z = M'M.$$

Систему координат $OXYZ$ называют *геоцентрической*, если ее начало совмещено с центром общего земного эллипсоида (центром масс Земли), а ось Z - с осью вращения Земли.

Формулы связи геодезических (B, L, H) и геоцентрических (X, Y, Z) координат имеют вид [2, 5, 12]

$$\left. \begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L, \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L, \\ Z &= (1 - e^2)(N + H) \sin B \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

При решении обратной задачи геодезическую широту B находят методом последовательных приближений, через геоцентрическую широту Φ :

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} L &= X/Y, \\ \operatorname{tg} B &= \operatorname{tg} \Phi + \frac{e^2 N \sin B}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad \text{при } Z \leq \sqrt{X^2 + Y^2}, \\ \operatorname{ctg} B &= \operatorname{ctg} \Phi - \frac{e^2 N \sin B}{Z} \quad \text{при } Z > \sqrt{X^2 + Y^2}, \\ H &= (\sqrt{X^2 + Y^2}) / \cos B - N \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

где

$$\operatorname{tg} \Phi = Z / \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad \operatorname{ctg} \Phi = \sqrt{X^2 + Y^2} / Z$$

В первом приближении геодезическую высоту B вычисляют из выражения $\operatorname{tg} B = \operatorname{tg} \Phi / (1 - e^2)$ и уточняют в последующих приближениях.

В геодезии широко используют нормальные сечения эллипсоида - кривые, полученные пересечением его поверхности плоскостью, проходящей через нормаль к поверхности в данной точке. Два из этих сечений, имеющие максимальную и минимальную кривизну, называются *главными нормальными сечениями*, а радиусы их кривизны - *главными радиусами кривизны*. Первое называется *меридианным сечением* (PAESBTP, рис. 1.3), а второе, перпендикулярное к нему, - *нормальным сечением первого вертикала* (QAQ). Радиусы их кривизны равны:

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{W^3} = \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 B)^3}}, \quad N = \frac{a}{W} = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \quad (1.4)$$

где M - радиус кривизны меридиана; N - радиус кривизны первого вертикала; B - широта точки; $W = (1 - e^2 \sin^2 B)^{1/2}$ - первая функция широты.

Кроме того, часто используют средний радиус кривизны R , радиус кривизны параллели r и радиус нормального сечения R_A по направлению A

$$\left. \begin{aligned} R &= \sqrt{MN} = \frac{a\sqrt{1 - e^2}}{(1 - e^2 \sin^2 B)}, \quad r = N \cos B, \\ R_A &= R(1 - 0,5e'^2 \cos^2 B \cos 2A). \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

В общем случае нормали к поверхности эллипсоида в двух его точках не пересекаются и не лежат в одной плоскости, а прямое и обратное нормальные сечения не совпадают (рис. 1.5). Кратчайшим расстоянием между этими точками является *геодезическая линия* - кривая, во всех точках которой соприкасающаяся плоскость проходит через нормаль к поверхности. Заметим, что геодезические линии на поверхности имеют то же значение, что и прямые линии на плоскости.

Угол Δ (рис. 1.5) между взаимными нормальными сечениями невелик и вычисляется по следующей приближенной формуле:

$$\Delta = \frac{p''}{4} \left(\frac{S}{N_m} \right)^2 e^2 \cos^2 B_m \sin 2A, \quad (1.6)$$



Рис. 1.5. Нормальные сечения и геодезическая линия

где S - длина геодезической линии (расстояние между ее конечными точками); N_m - радиус кривизны первого вертикала; B_m - широта; A - азимут нормального сечения; $p'' = 206265$. Нижний индекс « m » означает, что соответствующая величина относится к средней точке.

Угол Δ между геодезической линией и прямым нормальным сечением, составляет 1/3 расхождения Δ . Поэтому при $B_m = 45^\circ$ и $S = 100$ км получим, что $\Delta = 0'',042$ и $\delta = 0'',014$. Поправки δ учитываются только при обработке высокоточных геодезических построений и решении задач на большие расстояния.

§ 3 Ориентация эллипсоида в теле планеты

Пространственные прямоугольные координаты и высота точки зависят от ориентации эллипсоида, его формы и размеров. Определение этих параметров требует обработки обширных градусных или спутни-

КОВЫХ измерений, вычисления большой полуоси и полярного сжатия эллипсоида и, наконец, его ориентирования в теле Земли путем установления *исходных геодезических дат*: геодезической широты B_0 , долготы L_0 , высоты H_0 и начального (исходного) азимута A_0 соответствующей координатной системы.

В общем случае ориентирование эллипсоида сводится к тому, что астрономические координаты и азимут в начальном пункте приравниваются к геодезическим координатам и азимуту, а аномалия высот ζ_0 приравнивается нулю:

$$B_0 = \varphi_0, \quad L_0 = \lambda_0, \quad A_0 = \alpha_0, \quad H_0 = H_0^y. \quad (1.7)$$

Поскольку для стран с большой территорией отступления геоида от эллипсоида могут оказаться значительными, при выборе положения эллипсоида стремятся, по возможности, выполнить три условия [5]:

- 1) центр эллипсоида должен совпадать с центром масс Земли;
- 2) плоскость экватора должна совпадать с плоскостью земного экватора;
- 3) сумма квадратов отступлений высот геоида от поверхности эллипсоида должна быть минимальной

$$\sum_1^{\infty} \zeta_i^2 = \min. \quad (1.7, a)$$

Принимая во внимание третье условие, учтем высоту геоида в начальном пункте и исправим астрономические координаты поправками за уклонение отвесной линии. Тогда вместо (1.7) будем иметь [5]

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= \varphi_0 - \xi_0 - 0''.171 \times H_0 \sin 2\varphi_0, \\ L_0 &= \lambda_0 - \eta_0 \sec \varphi_0, \\ A_0 &= \alpha_0 - \eta_0 \tan \varphi_0, \\ H_0 &= H_0^y + \zeta_0 \end{aligned} \right\}, \quad (1.8)$$

где $\varphi_0, \lambda_0, \alpha_0$ - астрономические широта, долгота начального пункта и азимут исходного направления из астрономических наблюдений; H_0^y, ζ_0 - нормальная высота и высота геоида над эллипсоидом в начальном пункте; ξ_0, η_0 - составляющие уклонения отвесной линии в плоскости меридиана и первого вертикала соответственно.

Геодезическая долгота L_0 определяет положение плоскости меридиана, содержащей начальный пункт; геодезическая широта B_0 - положение нормали к поверхности эллипсоида, проходящей через на-

чальный пункт; геодезический азимут A_0 ограничивает его вращение вокруг нормали, а геодезическая высота H_0 - фиксирует эллипсоид относительно поверхности Земли.

Эллипсоид устанавливается так, чтобы он наилучшим образом подходил для определенной территории или планеты в целом. В первом случае речь идет о *референцном эллипсоиде*, параметры которого вместе с государственной системой координат и высот и утверждаются на уровне правительства страны; во втором случае - об *общеземном эллипсоиде*, используемом, преимущественно, для обеспечения работы космических аппаратов, при использовании спутниковых измерений в геодезии, навигации, и др.

На территории СССР до 1946 года использовался эллипсоид Ф. В. Бесселя, параметры которого наилучшим образом соответствовали территории Западной Европы, но оказались чрезмерно приближенными для европейско-азиатской части территории СССР. В связи с этим в 1940 году 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 на 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 году был принят для территории СССР в качестве *референц-эллипсоида*.

Примерами общеземных эллипсоидов и соответствующих координатных систем являются WGS-84 (World Geodetic System, 1984 г.), ПЗ-90 и ПЗ-90.02 («Параметры Земли», 1990 г.) на соответствующих эллипсоидах.

Поддержка параметров общеземных и референчных 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.

Так, общеземной эллипсоид WGS-84 поддерживается сетью ITRF (International Terrestrial Reference Frame), включающей около 500 пунктов, а эллипсоиды ПЗ-90 и СК-95 - 72 пунктами Фундаментальной (ФАГС) и Высочоточной (ВГС) геодезической сети, единой для России и ряда стран СНГ.

§ 4 Системы высот

Превышения между точками земной поверхности, полученные геометрическим нивелированием, строго говоря, зависят от пути нивелирования. Причиной этого является непараллельность уровенных поверхностей между собой, что обусловлено распределением плотности внутри Земли, ее формой и др. В зависимости от способа учета этой непараллельности различают высоты геодезические, ортометрические и нормальные (рис. 1.6).

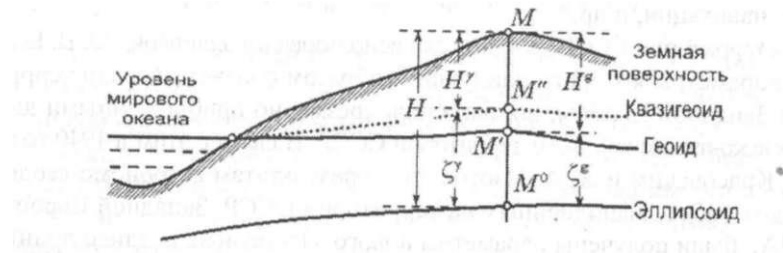


Рис. 1.6. Геодезические, ортометрические и нормальные высоты

Ортометрическая высота точки земной поверхности отсчитывается относительно поверхности геоида (отрезок $M'M$), для ее определения требует наличия среднего значения силы тяжести на отрезке MM' , что практически недостижимо. Ортометрическая система высот используется в США, Канаде, Австралии, Бельгии, Дании, Финляндии, Ирландии, Италии, Нидерландах, Португалии, Испании, Швейцарии, Турции, Тайване, Японии и некоторых других странах.

Нормальная высота точки земной поверхности отсчитывается относительно поверхности квазигеоида (отрезок $M''M$), поверхность которого с помощью соответствующего математического аппарата определяется вполне однозначно относительно эллипсоида и геоида. Такая система принята в России, странах СНГ и некоторых европейских странах (Швеции, Германии, Франции и др.). Поверхность квазигеоида, строго говоря, не является уровенной поверхностью гравитационного потенциала, однако ее можно определить по результатам измерений на физической поверхности Земли.

Геодезическая высота (H) связана с нормальной (H^N) и ортометрической (H^O) высотами следующей зависимостью (рис. 1.6;):

$$H = H^N + \zeta^N = H^O + \zeta^O \quad (1.9)$$

где ζ^N , ζ^O - высоты квазигеоида и геоида над эллипсоидом (аномалии высот).

По современным данным, высоты геоида над общим земным эллипсоидом меняются в пределах от -107 до 87 м., среднее квадратическое значение высоты геоида в целом по земному шару составляет около 30 м.

Поверхности геоида и квазигеоида на территории Мирового океана между собой совпадают; в равнинных районах расстояние между ними составляет несколько сантиметров, а в высокогорных районах может достигать 2,0 - 2,5 м [5].

Отсчет высот во всем мире выполняется относительно уровенных постов, в которых средний многолетний уровень моря отождествляется с поверхностью геоида. Несовпадение средних уровней морей вызывает различия в разных странах систем отсчета высот (рис. 1.7), что должно **учитываться** при уравнивании планетарных геодезических построений [13].

В России и странах СНГ высоты отсчитываются в Балтийской системе высот 1977 г., относительно нуля Кронштадтского футштока, фиксирующего средний многолетний уровень Финского залива Балтийского моря.

Современные технологии и состояние технических средств снимают остроту вопроса относительно эффективности использования ортометрических и нормальных высот, поскольку в настоящее время находят применение цифровые модели планетарного геоида (квазигеоида), создаваемые по результатам анализа возмущений (уклонений от расчетных) орбит искусственных спутников Земли и данных наземных гравиметрических измерений. Так, в настоящее время на основе спутниковых наблюдений разработано несколько МО-



Рис 1 7 Различия (в см) региональных систем высот на территории Европы [13]

делей геопотенциала, например, GRIM5 (Gravity Field Model), ПЗ2002/360 (2002 г., Россия), EGM96 (Earth Gravitational Model, 1996 г.) и др., причем модель геопотенциала EGM96 рекомендована Международной службой вращения Земли для обработки астрометрических и геодезических наблюдений. Точность определения с их помощью превышений геоида (квазигеоида) над эллипсоидом характеризуется средней квадратической погрешностью порядка 0,3 м [17]. Такие модели широко используются программным обеспечением спутниковых приемников, обрабатываемыми комплексами и системами (например, PHOTOMOD).

Имеются проекты, реализация которых позволит определять гравитационные аномалии с пространственным разрешением 100 км и относительной ошибкой порядка 10^{-8} , при этом высоты геоида (квазигеоида), как ожидается, могут быть найдены с ошибкой 1 см .

¹ Жаров В. Е. Сферическая астрономия. - МГУ, 2002 (WWW.astronet.ru/db/msg/1190817)

Глава 2

СИСТЕМЫ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ КООРДИНАТ

При топографических съемках и землеустроительных работах рассмотренные ранее планетарные координатные системы заменяются выбранной по тем или иным правилам системой плоских прямоугольных координат, основным преимуществом которой является существенное упрощение вычислительной обработки результатов измерений за счет замены математического аппарата сферической тригонометрии более простыми и наглядными формулами геометрии и тригонометрии на плоскости.

К важнейшим требованиям, учитываемым при выборе системы плоских координат, относят сравнительную простоту учета искажений, возникающих при изображении пространственного объекта на плоскости, и возможность проецирования на эту плоскость больших участков поверхности эллипсоида без разрывов, при заданной величине искажений. Существенным является и характер таких искажений, причем наиболее выгодным, удобным является такой способ отображения (проецирования), когда при переносе углов с эллипсоида на плоскость их величины сохраняются неизменными. Это достигается выбором такого математического аппарата построения проекции, при котором значение масштаба изображения, изменяясь от одной его точки к другой, в каждой из них остается одинаковым по всем направлениям. При этом сохраняется подобие бесконечно малых фигур при их переносе с эллипсоида на плоскость и практическое постоянство масштаба отображения малых по площади участков. Картографические проекции, обладающие таким свойством, называются **к о н ф о р м н ы м и**.

§ 5 Конформная проекция Гаусса-Крюгера

Теория конформного изображения одной поверхности на другой (в частности - эллипсоида на плоскости) и его практического использования в геодезических целях была разработана в 1820–1830 гг. Гауссом. Систематизации этих работ и их публикации в немалой степени способствовал немецкий геодезист Крюгер, которым был разработан ряд вопросов теории и практики применения плоских прямоугольных ко-

ординат в геодезии. Поэтому система координат, полученных на основе теории конформных преобразований Гаусса, принято называть системой координат **Гаусса-Крюгера**. Эта система, принятая в России, странах СНГ и ряде других государствах, отвечает следующим **условиям**:

- изображение на плоскости является конформным;
- осевой меридиан и экватор в плоскости проекции изображаются прямыми линиями и пересекаются под прямыми углами;
- масштаб изображения осевого меридиана на плоскости проекции постоянен и равен единице;
- начало координат в плоскости проекции совпадает с точкой пересечения осевого меридиана и экватора, которые и принимаются оси абсцисс и ординат.

Сущность конформного проецирования заключается в следующем.

Представим себе эллиптический цилиндр, который касается эллипсоида по меридиану, называемому осевым, и математическим путем спроецируем на его поверхность некоторый фрагмент эллипсоида (зону), заключенный между граничными меридианами² (рис. 2.1, а). Разрезав цилиндр вдоль образующей и развернув его поверхность в плоскость, получим изображение зоны (рис. 2.1, б), на котором осевой меридиан и экватор окажутся взаимно перпендикулярными.

При проецировании элементов эллипсоида на плоскость проекции с учетом условия конформности масштаб m изображения точек изменяется в зависимости от их удалений от осевого меридиана, согласно формуле

$$m = 1 + \delta_m \approx 1 + \frac{y^2}{2R^2} + \frac{y^4}{24R^4} + \dots \quad (2.1)$$

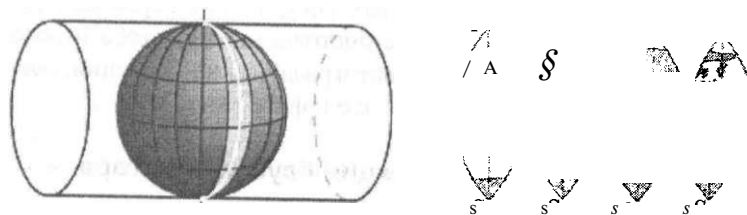


Рис. 2.1. Проецирование поверхности планеты на касательный цилиндр (в), развертка которого дает проекции зон (б)

² Строго говоря, здесь дана геометрическая интерпретация поперечно-цилиндрической проекции **Меркатора (UTM)**, эквивалентной проекции Гаусса-Крюгера, если масштаб изображения осевого меридиана равен единице.

Таким образом, длины конечных отрезков при проецировании увеличиваются и получают поправку, величину которой с необходимой для практических нужд точностью можно вычислить по следующей формуле:

$$\delta S_{\text{пр}} = S \times \delta_m \approx S \times \frac{y^2}{2R^2}, \quad (2.2)$$

где $\delta S_{\text{пр}}$ - искажение длины линии, обусловленное проецированием эллипсоида на поверхность цилиндра; S - ее длина на эллипсоиде; y - среднее удаление концов от осевого меридиана; R - средний по линии радиус кривизны эллипсоида.

Наличие таких искажений требует, чтобы обработка результатов геодезических измерений включала операции редуцирования длин линий и направлений с эллипсоида на **ПЛОСКОСТЬ**.

Как следует из формул (2.1) и (2.2), масштаб изображения по мере удаления от осевого меридиана быстро увеличивается, и одновременно нарастают искажения $\delta S_{\text{пр}}$ длин конечных отрезков, поэтому ширину координатных зон ограничивают так, чтобы искажения длин линий не превышало установленной величины.

При создании топографических карт масштаба $1:10000$ и **мельче** проецируемую зону ограничивают меридианами с разностью долгот 6° , а карт и планов масштаба $1:5000$ и крупнее - 3° . На широте 35° ($y = 3 \times 6378 \times \cos 35^\circ / 57,296 \approx 274$ км) найденная по формуле (2.2) относительная погрешность проецирования $\delta S/S$ для 6-градусной зоны не превысит равной $1:1100$, а для 3-градусной зоны - $1:4000$. На широте Минска (55°) указанные искажения, вызванные спецификой построения проекции, составят $1:2200$ для 6-градусной зоны ($y \approx 191,7$ км) и $1:8860$ для 3-градусной зоны (y и $95,8$ км).

В связи с этим значительные по площади территории, границы которых удалены от осевого меридиана более чем на 3 или 6 градусов, проецируют по частям. Сначала проецируют первую зону шириной 3 или 6 градусов (рис. 2.1, а), после чего цилиндр разворачивают на 6 или 3 градуса и выполняют проецирование очередной зоны, и т.д., наконец, разрезают его по образующей и разворачивают в плоскость (рис. 2.1, б). Аналогично создаются все шестьдесят 6-градусных и сто двадцать 3-градусных зон.

Шестиградусные зоны нумеруются с запада на восток, начиная с Гринвичского меридиана, имеющего долготу 0° . Зона 1 простирается от меридиана 0° до меридиана 6° , ее осевой меридиан имеет долготу 3° . Зона 2 - с 6° до 12° , и т.д. (рис. 2.2), причем, 6-градусные зоны совмещаются с колоннами листов топографических карт масштаба $1:1\,000\,000$.

Осевые меридианы 3-градусных зон совпадают с граничными и осевыми меридианами 6-градусных зон (рис. 2.2).

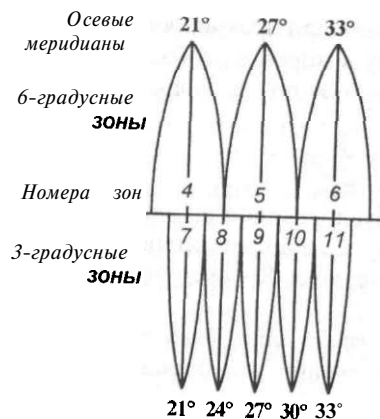


Рис. 2.2. Координатные зоны проекции Гаусса-Крюгера и их осевые меридианы

Смежные координатные зоны перекрываются к востоку и к западу на величину, зависящую от широты территории.



Рис. 2.3. Сетка координат, параллели и меридианы в зоне проекции Гаусса-Крюгера

Счет зон ведется на восток от Гринвича; долготы осевых меридианов 6-градусной (L_6) и 3-градусной (L_3) зон вычисляются по их номерам (N_6 или N_3), по следующим формулам:

$$L_6 = 6^\circ \times N_6 - 3^\circ, \quad L_3 = 3^\circ \times N_3.$$

Координатные системы в каждой зоне устанавливаются одинаково: их начала совмещаются с точками пересечения осевых меридианов с экватором, оси абсцисс OX - с изображениями осевых меридианов, а оси ординат OY - изображением экватора. Положительные направления координатных осей - на север и на восток (рис. 2.3).

В практике ординаты точек y в 6-градусных зонах увеличивают на 500 км и добавляют номер зоны ($\bar{y} = 1000000 \times N_3 + 500000 + y$), что исключает возможность появления одинаковых значений координат точек, расположенных в разных зонах, и отрицательных значений ординат. Потому для точки с ординатой $y = -103\,546,562$ м, расположенной в 6-й координатной зоне, будем иметь $\bar{y} = 6396\,453,438$ м.

Ординаты точек в 3-градусных зонах увеличивают на 250 000 м.

Формулы связи геодезических и плоских прямоугольных координат точек в проекции Гаусса-Крюгера, представленные в виде удобной для программирования схемы Горнера, имеют вид

$$l = L - L_0,$$

$$\begin{aligned} x &= a_5 B + (((a_4 l^2 + a_3) l^2 + a_2) l^2 + 0,5) l^2 N - a_1 \sin B \cos B_3 \\ y &= (((b_3 l^2 + b_2) l^2 + b_1) l^2) l N \cos B \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= A_5 + (((A_4 z^2 - A_3) z^2 + A_2) z^2 - 1) z^2 A_1, \\ l &= (((B_3 z^2 + B_2) z^2 + B_1) z^2 + 1), \\ L &= L_0 + l \end{aligned} \quad (2.4)$$

где x, y - плоские прямоугольные координаты в плоскости проекции Гаусса-Крюгера; B, L - геодезическая широта и долгота точки на эллипсоиде; L_0 - долгота осевого меридиана координатной зоны; l - удаление точки от осевого меридиана; N - радиус кривизны первого вертикала; $a_1 - a_5, b_1 - b_3, A_1 - A_5, B_1 - B_3, z$ - коэффициенты, учитывающие параметры эллипсоида и положение точки на эллипсоиде или на плоскости³. Величины B, L, L_0 и l представляются в градусной мере.

Формулы (2.1) - (2.4) справедливы для любой системы плоских прямоугольных координат, полученных применением поперечно-цилиндрической проекции с соблюдением общих принципов построения конформной проекции.

§ 6 Системы плоских прямоугольных координат

В практике при выполнении топографо-геодезических и земельно-кадастровых работ используют несколько координатных систем: 3-градусные и 6-градусные системы 1942 года (СК-42), 1963 года (СК-63), местные системы; некоторые работы требуют применения широко распространенной на западе системы UTM, а в недалеком будущем предстоит переход к системе координат 1995 года.

Рассмотрим кратко особенности перечисленных систем.

§ 6.1 Система координат 1942 года

Система координат 1942 года (СК-42) была введена Постановлением Совета Министров СССР в 1946 году, одновременно с введением на территории страны единой системы геодезических координат. Ее параметры были установлены в 1942 году по результатам совместного уравнивания звеньев триангуляции 1 класса, образующих 87 полигонов (4733 пунктов [14, 16]), покрывающих территорию Европейской части и распространяющихся далее на восток и на юг в виде узкой цепочки полигонов по территории Средней Азии и Юга Сибири.

Формулы для вычисления коэффициентов можно найти в учебниках «Сфероидическая геодезия» проф. В.П. Морозова, «Высшая геодезия» проф. П.С. Закатова, в работах [2, 5, 12] и др.



Рис. 2.4. Деформации АГС РБ [16]
Условные обозначения:

- деформации по оси абсцисс;
- деформации по оси ординат;
- Припятский регион

К началу 80-х годов, когда были завершены работы по развитию геодезической сети на всей территории страны, а геодезическая служба страны получила на вооружение мощную вычислительную технику, стало возможным решение задачи уравнивания всей Государственной геодезической сети (ГГС) как единого геодезического построения. Эта задача была решена в 1991 году общим уравниванием Астрономо-геодезической сети (АГС) в количестве более 164 тысяч пунктов.

Результаты уравнивания подтвердили наличие значительных деформаций ГГС в системе координат 1942 года, которая оказалась неоднородной по точности. При этом выявлены существенные региональные деформации, достигающие 20 - 30 м, и локальные деформации на границах блоков, рядов 1 класса и сплошных сетей 2 класса, которые в отдельных случаях достигали 10 и более метров [14].

Исследования [16] подтвердили наличие существенных деформаций Государственной геодезической сети Республики Беларусь. Как показало сравнение координат 30-ти пунктов в СК-42 и СК-95, их расхождения достигали 2,0 м по оси абсцисс и 1,5 м по оси ординат (рис. 2.4). При этом наиболее существенные искажения, достигающие 2 - 4 м [16], выявлены на территории Припятского нефтегазозонного региона и связываются с локальными геодинамическими явлениями.

В дальнейшем, по мере развития сетей триангуляции и полигонометрии, Государственная геодезическая сеть (ГГС) уравнивалась отдельными блоками. На границе блоков результаты предыдущего уравнивания принимались абсолютно точными. Таким образом, государственная геодезическая сеть распространялась в виде системы «нанизанных» один на другой полигонов 1-го класса, что должно было неизбежно привести к деформации геодезической сети на границе блоков, рядов 1 класса и заполняющей сети 2 класса [14].

§ 6.2 Система координат 1995 года

Результаты уравнивания Государственной геодезической сети 1991 года показали, что дальнейшее использование СК-42 не могло обеспечивать возрастающие требования к точности решению геодезических задач. Необходима была новая геодезическая сеть с высокой и практически однородной точностью координат на всех территории страны. Решение этой задачи оказалось возможным только с использованием всего комплекса имеющихся в то время высокоточных геодезических данных.

Для повышения достоверности результатов общего уравнивания АГС 1991 года и точности взаимного положения пунктов ГГС на больших расстояниях было принято решение о совместном уравнивании 164 000 пунктов АГС и всех имеющихся на тот момент высокоточных спутниковых данных. Эти данные включали 26 пунктов Космической геодезической сети (КГС), 134 пункта Доплеровской геодезической сети (ДГС) и 35 пунктов гравиметрической сети (ГС). Результаты завершенного в 1995 году совместного уравнивания перечисленных построений положили основу системы геодезических координат 1995 года (СК-95).

Координаты пунктов Государственной геодезической сети в СК-95 однородны по точности (табл. 2.1), что подтверждается результатами спутниковых определений [14].

Таблица 2.1

Ср. кв. погрешность взаимного положения пунктов СК-95	Значение погрешности, м
Смежных	0,02 - 0,05
Удаленных на 200 - 300 км	0,20 - 0,30
Удаленных на 500 км и более	0,50 - 0,80

При установлении СК-95 были сохранены параметры эллипсоида Красовского, и лишь несколько изменены параметры ориентирования эллипсоида в теле Земли. Это позволило минимизировать расхождения координат точек в СК-42 и СК-95 таким образом, что оказалось возможным полностью сохранить изданные ранее топографические карты масштаба 1:10000 на территорию Европейской части страны, Средней Азии и Юга Сибири.

Поскольку для СК-95, как и для СК-42, остаются справедливыми формулы (2.1) - (2.4), то переход к СК-95 связан только с подготовкой и переизданием каталогов координат и высот пунктов государственной геодезической сети страны.

Систему координат 1995 года поддерживают 72 пункта Фундаментальной геодезической сети (ФАГС) и Высоточной геодезической сети (ВГС), в том числе на территории Республики Беларусь 1 пункт ФАГС и 9 пунктов ВГС [16, 21] (§ 8). Система надежно связана с мировой геоцентрической системой ITRF, что обеспечивает возможность ее дальнейшей модернизации [14].

Система координат 1995 года (СК-95) введена Постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2000 года взамен системы координат 1942 года.

В Республике Беларусь, в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь, система координат 1995 года вводится с 1 января 2010 года, после завершения работ по модернизации государственной геодезической сети республики. Соответствующие подготовительные работы выполняются по плану, утвержденному правительством республики и включающему [20]:

- обследование и восстановление пунктов государственной геодезической сети 1 - 4 классов;
- создание в республике спутниковой геодезической сети (СГС-1);
- определение координат пунктов ФАГС и ВГС на эпоху введения СК-95 и перевычисление координат пунктов государственной геодезической сети из действующей СК-42 в устанавливаемую СК-95;
- создание и тиражирование каталогов координат и высот государственной геодезической сети в СК-95;
- разработку средств и методов установления связи СК-95 с европейскими и мировыми системами координат;
- перевычисление ключей связи местных координатных систем с СК-95.

Этим планом, кроме того, предусматривается выполнение гравиметрических работ, построение карты высот квазигеоида, определены меры по установлению на территории республики государственной системы высот и др.

Вводимая на территории Беларуси СК-95 основывается на точных спутниковых GPS-измерений, результатах уравнивания сети и будет отличаться от СК-95 России [20].

Аналогичные по характеру работы ранее выполнены соответствующими службами Украины и завершены вводом в действие национальной системы координат УСК-2000.

Имеются основания полагать, что по этому же пути пойдут и другие страны СНГ.

§ 6.3 Система координат проекции UTM

Проекция UTM (Universal Transverse Mercator), часто называемая проекцией Гаусса-Боага, широко применяется в работах по дистанционному зондированию, при построении баз данных природных ресурсов и др. Она является конформной и предполагает деление поверхности эллипсоида на 6-градусные зоны по долготе и 8-градусные ряды по широте (за исключением самого северного, который составляет 12 градусов).

В отличие от проекции Гаусса, в проекции UTM проецирование выполняется не на касательный цилиндр, а на секущий (рис. 2.5). При этом масштаб изображения осевого меридиана в проекции UTM принят равным 0,99960 (вместо единицы в проекции Гаусса-Крюгера). Два меридиана, по которым цилиндр пересекает поверхность эллипсоида, имеют масштаб изображения, равный единице, и на экваторе удалены от осевого на 200 км. В национальных системах координат масштаб изображения осевого меридиана и положение секущих меридианов могут принимать иные, более удобные для территории значение.

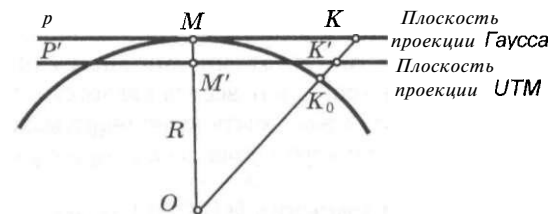


Рис. 2.5. Различия между проекциями Гаусса-Крюгера и UTM (Гаусса-Боага)

Математическая модель проекции UTM аналогична модели проекции Гаусса-Крюгера и отличается от нее лишь масштабом изображения осевого меридиана. Основные формулы, связывающие элементы проекции Гаусса-Крюгера и левой системы координат UTM (ось абсцисс x направлена на север), имеют следующий вид:

$$x_{UTM} = kx_{ГК}, \quad y_{UTM} = ky_{ГК}, \quad m_{UTM} = km_{ГК}, \quad \gamma_{UTM} = k\gamma_{ГК}, \quad (2.5)$$

где $x_{UTM}, y_{UTM}, x_{ГК}, y_{ГК}$ - координаты точки в проекциях UTM и Гаусса-Крюгера, вычисленные по формулам (2.3); m - масштаб изображения в произвольной точке проекции Гаусса-Крюгера; $k = 0,99960$ - масштаб изображения осевого меридиана в проекции UTM; γ - сближение меридианов.

§ 7 Местные системы координат

Геодезические сети на застроенных территориях предназначены для обеспечения крупномасштабного картографирования, при котором контуры местности и элементы инфраструктуры показываются с минимальными искажениями. Кроме того, по понятным причинам принятая для создания таких планов система координат должна оставаться стабильной (в отличие от государственной системы, которая может периодически переуравниваться). Эти цели достигаются применением специально установленной плоской прямоугольной системы координат, связанной с государственной системой некоторыми параметрами, а также, при необходимости, проецированием измерений на средний уровень территории.

Такая система называется местной системой координат (МСК), под которой понимается «... система координат, установленная в отношении ограниченной территории, начало отсчета и ориентировка осей которой смещены по отношению к началу отсчета координат и ориентировке осей координат государственной системы координат ...» [19].

Общий порядок установления МСК определяется нормативными документами правительственного уровня (например, в России эти вопросы регулируются постановлением Правительства [19]), а техническая сторона вопроса сводится к выбору исходной системы, метода ее создания и ключей связи с государственными системами. При этом, поскольку местная система координат всегда является плоской и прямоугольной, ее установление может быть выполнено методами аналитической геометрии или путем картографических преобразований.

§ 7.1 Установление МСК методом ортогональных преобразований

В основе метода ортогональных преобразований лежат общие формулы связи двух плоских прямоугольных координатных систем с учетом смещения начала исходной координатной системы (как правило, государственной) и создаваемой местной системы, разворота координатных осей исходной системы на некоторый угол и изменения масштаба проецирования. Перечисленные операции описываются формулами

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

где x, y, X, Y - координаты произвольной точки в местной и исходной (государственной) системах координат; x_0, y_0, X_0, Y_0 - координаты

начальной точки в местной и исходной системах координат; φ - угол между координатными осями местной и исходной (государственной) систем координат; t - масштабный коэффициент местной системы координат.

Исходная система, называемая образующей, всегда является одной из государственных (принятых соответствующим решением правительства) и может быть представлена координатами в 6-градусной, 3-градусной зоне СК-42, СК-95 или СК-63; чаще всего в качестве таковой используется система, осевой меридиан которой ближе к центру территории, для которой устанавливается местная система координат.

Начало МСК обычно выбирается в центре территории. Значение масштабного коэффициента t связывается с выбором поверхности относительности. Из рис. 2.6, следует, что при построении изображения на плоскости, отстоящей от касательной к поверхности эллипсоида на величину H , длины отрезков изменяются на величину

$$\delta S_H = S \frac{H}{R}, \quad (2.8)$$

а масштаб изображения становится равным

$$t = (1 + H/R), \quad (2.9)$$

где R - средний радиус кривизны; H - средняя геодезическая высота территории.

Величина угла φ обычно соответствует сближению меридианов в начальной точке МСК, что позволяет совместить ось абсцисс местной системы координат с направлением на север.

Как следует из формул (2.6) и (2.7), в общем случае местную систему координат связывают с государственной системой шесть величин ($X_0, Y_0, x_0, y_0, \text{ср}$ и t), называемых ее ключами. Практически часть из них может не использоваться (чаще всего $x_0 = y_0 = 0, \text{ср} = 0$ или $t = 1$), и, следовательно, при выборе одной и той же образующей системы в рамках метода ортогональных преобразований существует возможность выбора четырех - пяти вариантов ключей. Если же учесть, что в качестве образующей может быть выбрана СК-42 (с 3-градусной или 6-градусной зоной) или СК-63, то число возможных вариантов установления ключей возрастает до пятнадцати.

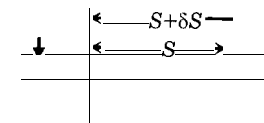


Рис. 2.6. Учет высоты проецирования

Полученные при создании МСК ключи, наименование и параметры образующей системы хранятся в органах государственного геодезического надзора, имеют гриф и выдаются заинтересованным предприятиям и организациям в установленном порядке.

§ 7.2 Установление МСК методом конформных преобразований

При значительных искажениях, обусловленных проецированием поверхности эллипсоида на плоскость, необходимо учесть положение начала МСК и текущей точки, что достигается использованием следующих формул вместо (2.6) и (2.7) [15]:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X - Q_1 \\ \Delta Y - (Q_2 - Q_3) \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} X_0 + Q_1 &= X - X_0 \\ Y_0 + (Q_2 - Q_3) &= Y - Y_0 \\ \Delta X &= X - X_0 \\ \Delta Y &= Y - Y_0 \\ Q_1 &= Y_0 \Delta X (2Y - Y_0) \\ Q_2 &= Y_0^2 \Delta Y \\ Q_3 &= Y_0 (\Delta X^2 - \Delta Y^2) \end{aligned} \quad (2.11)$$

где Q_1, Q_2, Q_3 – поправки за изменение масштаба проецирования, зависящие от удаления начала МСК от осевого меридиана и вытекающие из формулы (2.2).

Значение масштабного коэффициента вычисляют в зависимости от высоты поверхности проецирования по формуле (2.9).

Величины $X_0, Y_0, x_0, y_0, \varphi, t$ (или H) и наименование исходной («образующей») системы координат называют ключами МСК.

Как и при использовании метода ортогональных преобразований, в формулах (2.10) и (2.11) часто принимают $x_0 = y_0 = 0, t = 1$ или $\varphi = 0$. В частном случае, когда $x_0 = y_0 = \varphi = 0, t = 1, X_0 \neq 0, Y_0 \neq 0$, для перехода к МСК достаточно ввести только смещения по координатным осям.

§ 7.3 Установление МСК путем изменения параметров проецирования (СК-63)

Изменение параметров проецирования предполагает использование системы координат 1963 года (СК-63) со смещенным **ОСЕВЫМ** меридианом и координатной сеткой.

Система координат 1963 года создана на основе общегосударственной системы (СК-42 или СК-95) и имеет следующие особенности:

- система является 3-градусной;
- осевые меридианы зон смещаются на определенную величину;
- абсциссы точек вводятся поправки ΔX ;
- величины смещений осевых меридианов и поправок ΔX являются ключами системы и устанавливаются для региона, объединяющего обширную территорию с устойчивыми хозяйственными связями;
- ординаты точек в СК-63 увеличиваются на 250 км; в качестве их старшей цифры принимается номер зоны в регионе.

Так, установленная для Республики Беларусь СК-63 включает четыре 3-градусные зоны с номерами 0, 1, 2 и 3.

Величины смещений осевых меридианов и поправок к абсциссам представляют собой установленные для региона (территории Украины, Белоруссии и др.) ключи системы, которые хранятся в органах государственного, геодезического надзора и выдаются заинтересованным предприятиям и организациям в установленном порядке.

Установленная таким образом СК-63 развернута развернута и смещена относительно государственной путем изменения долготы осевого меридиана и введения поправки в абсциссы, поэтому относится к местным и широко используется для обширных территорий.

Для преобразования координат точек из СК-42 (СК-95) в СК-63 последовательно вычисляются:

- координаты точки, отнесенные к осевому меридиану и экватору (т.е. из ординат вычитается 250 км или 500 км и исключается номер 6-градусной координатной зоны);
- геодезическая широта точки B , ее удаление l от осевого меридиана исходной системы по формулам (2.4);
- полные геодезические координаты B, L с учетом долготы осевого меридиана;
- удаление l_{63} относительно осевого меридиана L_{63} соответствующей координатной зоны СК-63 региона;
- прямоугольные координаты X и Y , отнесенные к экватору и осевому меридиану L_{63} по формулам (2.3);
- искомые координаты в СК-63 путем введения в абсциссы смещения ΔX , увеличения ординат на 250 км и учета старшей цифрой номера зоны.

Указанные преобразования можно представить следующей схемой:

$$(X, Y)_{63} \leftarrow (X, Y)_{63} \leftarrow (B, l)_{63} \leftarrow (B, L) \leftarrow (B, l)_{исх} \leftarrow (x, y)_{исх} \quad (2.12)$$

Заметим, что абсциссы точек установленной таким образом местной системы координат отсчитываются относительно экватора, что крайне неудобно. Поэтому в большинстве случаев полученные по схеме (2.12) координаты преобразуются путем смещения их начала, разворота осей и т.п., по формулам (2.6) или (2.10).

Система координат 1963 года длительное время относилась к государственным системам и часто использовалась для установления местной системы координат.

§ 7.4 Другие методы установления МСК

Кроме рассмотренных выше методов установления местных координатных систем в практике применяются и некоторые другие, в частности - создание новой координатной зоны со своим осевым меридианом или так называемые компенсированные системы. К особенностям рассматриваемых ниже методов можно отнести отсутствие образующих систем координат, поскольку установление МСК предполагает использование картографических преобразований на основе формул (2.3) и (2.4).

Создание координатной зоны с новым осевым меридианом выполняется на основе названных выше формул и в общем случае включает:

- определение территории предстоящих работ с учетом перспективы ее расширения и выбор для нее центрального (осевого) меридиана;
- вычисление по формулам (2.4) геодезических координат B, L в исходной системе с установленным для нее осевым меридианом;
- вычисление по формулам (2.3) плоских прямоугольных координат x, y в местной системе с установленным для нее осевым меридианом.

На последнем этапе возможно применение метода ортогонального преобразования на основе формул (2.6) с установлением смещений, разворота координатных осей, редуцирование координат на среднюю высоту местности и (или) их разворот на некоторый угол в плоскости XU . Необходимый для этого масштабный коэффициент определяется по формуле (2.9), после чего он используется в формулах (2.6) в качестве множителя.

Указанные вычисления можно представить в виде следующей схемы:

$$\begin{aligned} (X, Y)_{MC} &\leftarrow (X, Y)_{МСК} \leftarrow (B, l)_{MC} \leftarrow \\ &\leftarrow (L) \leftarrow (B, l)_{ИСХ} \leftarrow (x, y)_{ИСХ} \end{aligned} \quad (2.13)$$

где оператор $(X, Y)_{MC} \leftarrow (X, Y)_{МСК}$ описывает преобразование по формулам (2.6), т.е. учет смещения, масштаба и поворота осей.

Примером использования рассмотренного подхода является местная система координат г. Минска, ключами которой являются: установленный для нее осевой меридиан; смещения вычисленных по формулам (2.3) плановых координат; разворот полученной системы на некоторый угол и высота поверхности относимости (масштабный коэффициент).

Создание компенсированной координатной системы предполагает подбор осевого меридиана и средней уровенной поверхности (поверхности относимости) таким образом, чтобы отрицательные поправки (2.8) за переход от средней плоскости территории к поверхности эллипсоида (на уровень моря) были равны по величине положительным поправкам (2.2) за редуцирование на плоскость проекции Гаусса-Крюгера [23], т.е.

$$|\Delta S_{ПР}| = |\Delta S_H|.$$

Подставляя в это выражение значения (2.2) и (2.8), получим

$$\frac{u^2}{2R^2} S^2 R = - S, \quad (2.14)$$

откуда следует, что компенсация поправок возможна при условии, что удаления от осевого меридиана не превысят величины

$$y \leq \sqrt{2RH} \quad (2.15)$$

Подбором высоты H добиваются, чтобы найденное значение ординаты было равно или несколько превышало размеры территории, для которой устанавливается компенсированная координатная система.

Так, при $R = 6378$ км и $H = 200$ м, получим, что компенсация поправок возможна при значениях ординат $y < 50$ км.

После этого создается новая координатная зона с осевым меридианом, проведенным через центральную точку территории.

Создание компенсированной системы, как и специальной координатной зоны, завершается ортогональными преобразованиями (2.6), поскольку вычисленные по формулам (2.3) координаты для зоны с установленным осевым меридианом отсчитываются относительно экватора, что крайне неудобно. Довольно часто ортогональные преобразования ограничиваются только смещением начала координат, но в принципе здесь сохраняется возможность выбора различных комбинаций параметров.

§ 7.5 Местные координатные системы Республики Беларусь

Работы по созданию местных координатных систем в Республике Беларусь начаты еще в довоенный период и выполнялись, в основном, специалистами РУП Белгеодезия (предприятия № 5, Западного АГП) и Треста инженерно-строительных изысканий (ТИСИЗа, БелТИСИЗа).

Согласно хранящемуся в Госкартгеоцентре КATALOGу МСК, содержащему первоначально установленные ключи, местные системы координат созданы в 265 населенных пунктах; данные об их числе и образующих системах представлены в табл. 2.2, где цифры в скобках после наименования системы обозначают «3-градусная» или «6-градусная».

Таблица 2.2

№ п/п	Область	Всего МСК	Образующая система				
			СК-42 (6)	СК-42 (3)	СК-63	Спецзона*	ОРП**
1	Брестская	39	12	11	12	-	4
2	Витебская	60	9	20	19	1	11
3	Гомельская	35	5	16	6	-	8
4	Гродненская	35	10	12	10	-	3
	Минская	55	28	2	10	7	8
6	Могилевская	41	8	13	12	-	8
Итого по республике		265	72	94	69	8	42

* Создана специальная координатная зона.

** Ориентирование МСК выполнено по ориентирному пункту.

Анализ приведенных данных показывает, что:

- подавляющее большинство местных координатных систем (63,5%) создано в 3-градусной координатной зоне или со специально установленным осевым меридианом, и, следовательно, характеризуется весьма незначительными погрешностями, вызванными способом проецирования;

- значительное число систем (42 населенных пункта или 15% всех МСК) установлено с использованием ориентирного пункта, т.е. без явного указания координатной зоны образующей системы - ее осевого меридиана и протяженности по долготе (3°, 6°).

Следствием преимущественного использования при установлении МСК ортогональных преобразований (§ 7.1) является сохранение в ней искажений, обусловленных влиянием метода построения образующей

координатной системы. Правда, эти искажения минимальны, так как выбиралась та образующая система, осевой меридиан которой ближе к центру территории.

Нужно отметить, что на территории республики активно, особенно с созданием в 1947 году топографо-геодезического предприятия, продолжались работы по сгущению государственной геодезической сети, восстановлению отдельных пунктов взамен уничтоженных, переносу их с одного места на другое и пр., что приводило к изменению геометрии сети и нарушению ее целостности. Поэтому указанные работы в необходимых случаях сопровождались уточнением ключей связи местных систем координат с государственной системой. Однако уточненные значения параметров преобразования, из-за отсутствия четкой системы мониторинга МСК, не доводились до потребителей, которые в этих условиях либо использовали первоначально установленные и не соответствующие действительности ключи КATALOGа МСК, либо определяли их самостоятельно. Обе ситуации не позволяют создать качественные электронные базы данных, в том числе и имеющий юридическую значимость Единый регистр недвижимого имущества республики.

В настоящее время специалистами топографо-геодезической службы республики, в соответствии с Планом мероприятий по переходу в начале 2010 года к СК-95, выполняются работы по обновлению ключей ее связи с местными системами координат.

Глава 3

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ

Рассмотренные ранее системы эллипсоидальных, геоцентрических и картографических координат реализуются через пункты государственной геодезической сети и спутниковые измерения, результаты которых представляются в одной из названных систем.

§ 8 Основные характеристики государственных геодезических сетей Российской Федерации и Республики Беларусь

*

В качестве геодезической основы топографических и земельно-кадастровых работ используются пункты государственных геодезической сети, нивелирной сети, геодезические сети сгущения (триангуляции и полигонометрии 1, 2 разрядов), пункты плановых и высотных съемочных геодезических сетей.

Государственная геодезическая сеть (ГГС) включает [4, 18]: фундаментальную астрономо-геодезическую сеть (ФАГС), высокоточную геодезическую сеть (ВГС), спутниковую геодезическую сеть 1 класса (СГС-1) и существующие сети астрономо-геодезической сети (АГС) 1 – 4 классов. В Республики Беларусь к ГГС относят также геодезические сети сгущения (ГСС), созданные в развитие СГС-1.

Фундаментальная астрономо-геодезическая. ФАГС представляет высший уровень в структуре координатного обеспечения территории.

ФАГС России включает пункты космической геодезической сети (КГС), лазерной локации спутников, радиоинтерферометрии сверхдлинно-базисной (РСДБ), службы вращения Земли и пр. Пространственное положение пунктов определяется методами космической геодезии в геоцентрической системе координат относительно центра масс Земли с точностью, указанной в табл. 3.1.

ФАГС Республики Беларусь представлена единственным пунктом Минск, связанным геодезическими измерениями с пунктами ФАГС Российской Федерации. Этот пункт закреплен основным центром, не менее четырьмя рабочими центрами и таким же количеством контрольных центров, совмещенных с вековыми фундаментальными нивелир-

ными реперами или пунктами образцовых эталонных базисов, удаленных от основного на расстояние не более 20 км. На одном из рабочих центров оборудована постоянно действующая станция спутникового автономного определения координат [4].

Таблица 3.1

Показатель	Параметры ФАГС в системе	
	ГГС России	ГГС РБ
Средняя длина стороны (D), км	650 – 1000	
СКП положения относительно центра масс Земли, см	10 – 15	10 – 15
СКП взаимного положения в плане и по высоте, мм	20 / 30	20 / 30
СКП взаимного положения относительно пунктов АГС в плане / по высоте, мм	20 / 20	20 / 30

Каждый пункт ФАГС России представляет собой систему из пяти пунктов и включает: 2 пункта существующей сети АГС, 2 пункта нивелирования I или II классов и рабочий центр для ГЛОНАСС/GPS наблюдений, снабженный устройством принудительного центрирования [14].

Высокоточная геодезическая сеть. ВГС, наряду с ФАГС, служит основой для развития геодезических построений последующих классов и совместно с гравиметрической информацией и данными нивелирования используется для создания высокоточных карт высот квазигеоида. Она представляет собой опирающееся на пункты ФАГС, однородное по точности пространственное геодезическое построение, пункты которого определяются относительными методами космической геодезии. Параметры точности пунктов ВГС России и Республики Беларусь одинаковы (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Показатель	Параметры ВГС
Средняя длина стороны (D), км	150 – 300
СКП взаимного положения в плане, мм	$3+5 \times 10^{-8} D$
СКП взаимного положения по высоте, мм	$5+7 \times 10^{-8} D$
СКП взаимного положения относительно пунктов АГС по каждой координате, мм	20

Пункты ВГС России закреплены на местности по той же схеме, что и пункты ФАГС. Каждый из девяти пунктов ВГС Республики Беларусь (Поставы, Полоцк, Витебск, Могилев, Гомель, Калинковичи,

Микашевичи, Кобрин, Скидель [16]) включает основной центр, рабочий и контрольный центры, удаленные от основного на расстояние не более 20 км [4].

Пункты ФАГС и ВГС обеспечены нормальными высотами, определенными нивелированием I или II классов точности и абсолютными значениями ускорения силы тяжести.

СПУТНИКОВАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ СЕТЬ 1 КЛАССА. СГС-1 предназначена для обеспечения оптимальных условий реализации точностных и оперативных возможностей спутниковой аппаратуры. Она создается относительно методами космической геодезии, представляет собой пространственное геодезическое построение, опирающееся на пункты ФАГС и ВГС и состоящее из системы легко доступных пунктов с плотностью, достаточной для эффективного использования всех возможностей спутниковых определений потребителями. Точностные параметры СГС-1 государственных геодезических сетей Российской Федерации и Республики Беларусь приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Показатель	Параметры СГС-1 в системе	
	ГГС России	ГГС РБ
Средняя длина стороны (D), км	25 – 35	15 – 25 / 8 – 12
СКП взаимного положения в плане, мм	$3+1 \times 10^{-7} D$	$3+1 \times 10^{-7} D$
СКП взаимного положения по высоте, мм	$5+2 \times 10^{-7} D$	$5+2 \times 10^{-7} D$
СКП взаимного положения относительно пунктов АГС в плане, мм	20	20
СКП положения по высоте относительно реперов III класса, мм	10	10
СКП взаимного положения относительно пунктов ФАГС, ВГС по каждой координате, мм	10 – 30	30

Каждый пункт СГС-1 Республики Беларусь включает основной центр и два пункта-спутника, совмещенных с грунтовыми реперами государственной нивелирной сети и удаленные от основного пункта на расстояние не менее 250 м на застроенной территории и 500 - 1000 м на незастроенной. Пункты-спутники должны находиться в прямой видимости с основным; расстояние между ними определяется со средней квадратической погрешностью $\pm 0,05$ м, а дирекционное направление - со средней квадратической погрешностью $\pm 5''$ [4].

Нормальные высоты пунктов СГС-1 определяются из геометрического или спутникового нивелирования с точностью, соответствующей требованиям к нивелирным сетям II и III классов.

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СЕТИ СГУЩЕНИЯ. ГСС, являющиеся, как и пункты АГС 1 - 4 классов, элементами государственной геодезической сети Республики Беларусь, создаются в развитие СГС-1 и характеризуются средними квадратическими погрешностями определения [4]:

- положения относительно ближайших пунктов ФАГС, ВГС и СГС-1 - не более 10 мм;
- взаимного положения смежных пунктов - не более 5 см;
- нормальных высот пунктов - не более 5 см.

Длины сторон ГСС должны находиться в пределах 8 – 40 км.

АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ СЕТЬ. АГС, являющаяся составной частью государственных геодезических сетей Российской Федерации и Республики Беларусь, представляет собой совокупность полигонов 1 класса, заполняющих сетей 2 класса и сетей сгущения 3 и 4 классов, или заменяющих их ходов полигонометрии соответствующих классов создаваемых в соответствии с Инструкцией [7]. Точность этой сети (табл. 3.4) позволяет выполнять на ее основе топографические съемки масштаба 1:500 и мельче.

Все пункты АГС закреплены на местности надежными и долговременными центрами, типы которых зависит от характера построения. Кроме того, они имеют по два закрепленных на местности долговременными центрами ориентирных пункта, удаленных от них на расстояние 500 – 1000 м.

Таблица 3.4

Показатель	Класс сети триангуляции (полигонометрии) АГС			
	1	2	3	4
Средняя длина стороны треугольника, км	20 – 25	7 – 20	5 - 8	2 - 5
Относительная СКП базисной стороны	1:400 000	1:300 000	1:200 000	1:200 000
Относительная СКП в слабом месте сети	1:150 000	1:150 000	1:120 000	1:70 000
Наименьший угол треугольника, градус	40	20	20	20
Допустимая невязка треугольника, с	3	4	6	8
СКП измерения угла по формуле Ферреро	$\pm 0,7$	$\pm 1,0$	$\pm 1,5$	$\pm 2,0$

Государственная нивелирная сеть включает нивелирные сети I, II, III и IV классов, нормальные высоты которых вычислены в Балтийской системе высот. Точностные параметры этих сетей приведены в табл. 3.5 [10].

Сети нивелирования I класса создаются в городах площадью более 500 км^2 , системы линий II класса – в городах площадью $50 - 500 \text{ км}^2$, нивелирная сеть III класса – в городах площадью $25 - 50 \text{ км}^2$, а нивелирная сеть IV класса – в городах площадью менее 25 км^2 ; во всех случаях имеют место особые требования к густоте пунктов и длинам линий нивелирования. В линии государственного нивелирования включают или привязывают к ним пункты спутниковой геодезической сети ФАГС, ВГС и СГС-1.

Таблица 3.5

Класс нивелирования	Периметры нивелирных полигонов, км		Случайная / систематическая ср. кв. ошибки мм / км	Допустимая невязка полигона, линий, мм
	обжитые / необжитые районы	застроенные / незастроенные территории городов		
I	1200 / 2000	зависят от очертания территории	0,8 / 0,08	$3\sqrt{L}$
II	400 / 1000	50 / 80	2,0 / 0,20	
III	60–150 / 100–300	25 / 40	5,0 / –	$10\sqrt{L}$
IV	20–60 / 25–80	8 / 12	10,0 / –	$20\sqrt{L}$

Пункты государственной нивелирной сети закрепляются на местности реперами и марками, типы которых зависят от их класса и условий территории.

Средняя плотность пунктов государственной геодезической и нивелирной сети, обеспечивающая создание съемочного геодезического обоснования топографических съемок и иных работ, как правило, должна быть не менее [8]:

- одного пункта на 5 кв. км на застроенных территориях городов, подлежащих застройке в ближайшие годы;
- одного пункта триангуляции (полигонометрии) на 20 - 30 кв. км и одного репера нивелирования на 10 - 15 кв. км при съемке в масштабе 1:5000;
- одного пункта триангуляции (полигонометрии) на 5 - 15 км^2 и одного репера нивелирования на 5 - 7 кв. км при съемке в масштабе 1:2000 и крупнее.

Дальнейшее увеличение плотности геодезической основы достигается путем построения геодезических сетей сгущения и съемочного обоснования.

Городские геодезические сети России, в соответствии с Руководством [21], создаются на основе спутниковых измерений и представ-

ляют собой исходный пункт и однородных по точности построений в виде каркасной сети и спутниковых городских геодезических сетей 1 и 2 класса; их технические характеристики и точностные параметры представлены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Тип сети	Точность определения координат, мм	Относительная ошибка определения длин линий, не менее	СКП взаимного положения пунктов, мм	Плотность пунктов
Исходный пункт (ИП)	10 – 20	1:1 000 000	–	1 - 3 на город
Каркасная сеть (КС)	10 - 20	1:500 000	15	1 п. на 40-100 кв. км
СГГС-1	10 - 20	1:150 000	20	1 п. на 5 – 40 кв. км
СГГС-2	10 – 20	1:50 000	–	по необходимости

Исходные пункты (ИП) представляют собой взаимосвязанную систему основных и контрольных центров, предназначенных для связи городской координатной системы с геоцентрической.

Пункты каркасной сети (КС) максимально совмещаются с исходными пунктами существующей в городе сети, расположенными на зданиях или имеющий центр глубокого заложения.

Пункты спутниковой городской геодезической сети 1 класса (СГГС-1) совмещаются с сохранившимися пунктами городской триангуляции 1, 2 и 3 классов, узловыми пунктами городской полигонометрии и пунктами высокоточных сетей специального назначения.

Пункты спутниковой городской геодезической сети 2 класса (СГГС-2) совмещаются с сохранившимися пунктами городской полигонометрии, пунктами высокоточных сетей специального назначения и пунктами съемочной сети.

Модернизация городской геодезической сети выполняется таким образом, что существующая в городе координатная система сохраняется, а пункты городской геодезической сети по мере выполнения работ заменяются пунктами спутниковой сети, так что со временем вся ранее созданная сеть городской триангуляции окажется перекрытой СГГС и потеряет свое значение.

§ 9 Геодезические приборы

Геодезические приборы классифицируют по области применения, точности, конструкции отсчетного устройства и др.

Так, действующий в России ГОСТ 10529-96 делит теодолиты, в зависимости от величины средней квадратической ошибки $m_{\text{измере-}}$

ния угла одним приемом, на высокоточные ($m_\alpha < 1''$), точные ($1'' < m_\alpha < 10''$) и технические ($m_\alpha > 10''$); нивелиры, в зависимости от величины средней **квадратической** ошибки превышения m_h на 1 км двойного нивелирного **хода**, делятся на высокоточные ($m_h < 0,5$ мм), точные ($1 \text{ мм} < m_h < 5$ мм) и технические ($m_h > 10$ мм).

Вместе с тем ведущие фирмы-изготовители этих инструментов Sokkia, Topcon, Nikon (Япония), Leica, Geodimeter, Trimble, Pentax УОМЗ (Россия), делают геодезические приборы на оптические, цифровые (электронные) и лазерные. Именно такая классификация представляется наиболее удобной для сравнения конструктивных особенностей, технических и функциональных возможностей приборов, поскольку их выбор определяется, в конечном итоге, пригодностью для выполнения тех или иных работ.

Геодезические приборы должны соответствовать некоторым общим требованиям. В частности, они должны быть работоспособны в различных физико-географических условиях, в различное время **года**, при температуре воздуха от -20 до $+50$ °С и относительной влажности до 95%; быть надежными, легкими и компактными, приспособленными для транспортировки любыми видами транспорта, пригодными для проверок и юстировок в полевых условиях и др.

Типичный вид наиболее распространенных геодезических приборов представлен на рис. 3.1 - 3.3, а технические параметры, характерные и для других приборов (Trimble, УОМЗ, и др.) - в табл. 3.7 - 3.9. Более полные сведения о выпускаемых приборах (в том числе различной точности) можно найти на сайтах, указанных в перечне литературы.

Оптические теодолиты и нивелиры (рис. 3.1, а, 3.2, а) отличается привычный вид, высокая надежность, высококачественная **оптика**, прочность конструкции, защищенность от внешних условий и пр. Теодолиты допускают установку на трубу дальнометрных насадок. Точностные



Рис. 3.1. Нивелиры: оптический Nikon AC-2S (а), электронные Trimble DiNi 12 (б), Sokkia SDL30 (в)

параметры выпускаемых оптических геодезических приборов (табл. 3.7, 3.8) соответствуют требуемым для различных видов топографо-геодезических работ (табл. 3.1 - 3.6), но их функциональные возможности ограничены отсутствием средств контроля измерений и записи полученных данных, что затрудняют их использование в рамках автоматизированных технологий.

Таблица 3.7

Параметр	Типы нивелиров			
	оптические		электронные	
	Nikon AC-2S	Spectra Precision AL200	DINI 12	Sokkia SDL30M
Увеличение зрительной трубы (х)	24	20 – 32	32	32
Минимальное расстояние, м	0,85	0,60	0,90	1,6
Точность на 1 км двойного хода, мм	± 2	$\pm 2,5 - 1,0$	$\pm 0,3 - 1,0$	1,0
Поле зрения (°)	1°30	1°20	1°20	Г20
Интервал градуировки гор. круга (°)	нет	1°	0,1°	нет
Масса, кг	1,25	1,8	3,5	2,4

Цифровые (электронные) теодолиты (рис. 3.2, б, в; табл. 3.8) снабжены электронными считывающими устройствами, минимальным внутренним программным обеспечением, максимально адаптированным к конкретному виду работ и с интуитивно доступным пользователю интерфейсом. Они лишены многих недостатков, присущих их оптическим предшественникам: снабжены монохромными графическими или текстовыми экранами (240x160 пикселей или 128x32 точек) и клавиатурой. Практически все приборы имеют высокий класс защиты от влаги и пыли, что обеспечивает их эксплуатацию в неблагоприятных условиях. Цифровой метод считывания отсчетов по угломерным датчикам практически полностью исключает ошибки отсчетов.

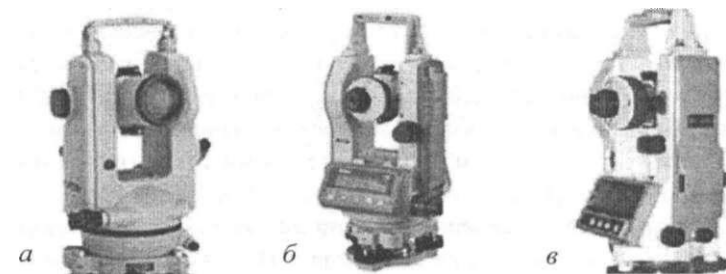


Рис. 3.2. Теодолиты: оптический TL-10G (а), электронные Nikon NE-202 (б), Nikon NE-20H (в)

Таблица 3.8

Показатели	Типы теодолитов					
	оптические		электронные			
	Торсон П LOG	УОМЗ ЗТ5КП	Nikon NE-202	Торсон DT-200	Nikon NE-20H	VEGA TE05
Увеличение трубы	30	30	30	30	26	30
Диаметр объектива, мм	40	40	45	45	36	40
Минимальное расстояние, м	0,9	0,9	0,7	0,9	1,0	1,3
Точность измерения углов (")	10	5	5 / 10	5, 7, 9	7, 10	5
Дисплей	нет	нет	2 строки	графич.	2 строки	2 строки
Клавиатура	нет	нет	есть	6 клавиш	есть	6 клавиш
Масса, кг	4,1	4,3	4,0	3,6	4,0	4,4

Цифровые (электронные) нивелиры (рис. 3.1, б, в; табл. 3.7) представляют собой современные многофункциональные геодезические приборы, совмещающие функции высокоточного оптического нивелира, электронного запоминающего устройства и встроенного программного обеспечения для обработки полученных измерений. Основная отличительная особенность цифровых нивелиров - это встроенное электронное устройство для снятия отсчета по специальной рейке с высокой точностью. Применение цифровых нивелиров позволяет исключить личные ошибки исполнителя и ускорить процесс измерения. Достаточно навести прибор на рейку, сфокусировать изображение и нажать на кнопку. Прибор выполнит измерение, отобразит на экране полученное значение и расстояние до рейки, зафиксирует отсчеты и результаты в памяти прибора. Последнее обстоятельство позволяет эффективно использовать цифровые нивелиры в автоматизированных технологиях обработки результатов работ.

Электронные тахеометры (рис. 3.3; табл. 3.9) сочетают удобство и простоту эксплуатации с высокой производительностью. Они снабжены встроенным или внешним контроллером, представляющим собой компьютер, вычислитель и (в некоторых моделях) пульт и(или) клавиатуру управления прибором. От его производительности, объема памяти, типа экрана, наличия и числа встроенных программ, наличия безотражательного режима работы зависят функциональные возможности прибора. Для управления работой прибора используется цифровая или алфавитно-цифровая клавиатура с 10 – 30 клавишами; в некоторых моделях она размещена с двух сторон. Ряд приборов снабжен полными PC-совместимыми QWERTY-клавиатурами.

Рис. 3.3. Электронные тахеометры:

Leica TPS 1200 (а), Торсон GTS 720 (б), Nikon (в), Торсон GPT 7000 (г)

Все электронные тахеометры обеспечены внешними или встроенными блоками памяти, позволяющими сохранять данные о нескольких тысячах точек, средствами экспорта результатов измерений в определенных форматах. Это обеспечивает возможность регистрации как результатов первичных измерений или их обработки (учета места нуля, координат, превышений и др.), так и текстовых строк в виде примечаний к наблюдаемым точкам.

Таблица 3.9

Технические характеристики	Электронные тахеометры						
	Sokkia SET-530R	Leica TCR-405	Nikon NPL-352	Торсон GPT-3005	Trimble 3305 DR	Trimble 3605 DR	Pentax 325N
Увеличение зрительной трубы	30 ^x	30 ^x	26 ^x	30 ^x	26 ^x	30 ^x	30 ^x
Точность измерения углов	5"	5"	5"	5"	5"	5"	5"
Диапазон компенсатора	±3"	±4"	±3"	±3"	±5"	±5"	±3"
Дальность измерений на одну призму, м	5000	3500	5000	3000	3000	3000	4000
То же, без отражателя	100	80	200	250	100	120	180
Точность измерения расстояний на призму, мм*	2+2·k*	2+2·k*	3+2·fe*	2+2·fe*	3+2·k*	3+2·k*	3+2·fe*
Объем памяти (точек)	10000	4000	10000	8000	1893	8000	7500
Вес кг	5,3	4,2	5,3	5,2	3,5	6,7	5,7

$$* k = 10^{-6} \times D$$

Внешние контроллеры электронных приборов часто имеют DOS-совместимые процессоры (например, типа Intel-486), а собираемая информация объемом несколько сотен или тысяч точек записывается на карты типа PCMCIA или на встроенную микросхему. Встроенные про-

граммы также могут быть записаны на внешних картах или встроенных микросхемах.

Нередко внешние контроллеры представляют собой серийно выпускаемые ручные компьютеры типа Husky или HP, оснащенные специальным программным обеспечением. В последнее время в этом качестве широко применяются полевые графические **пен-компьютеры** (pen pad computer) или компьютеры с активным (сенсорным) экраном, в которых реализована идея избавления от клавиатуры и возврата к использованию ручки или карандаша, но уже без традиционного полевого журнала. С их помощью можно не только управлять работой прибора, но и обработать на месте и просматривать графическое отображение результатов съемок на экране **пен-компьютера**.

Наиболее «продвинутые» электронные приборы оснащены сервоприводом и обеспечивают возможность как автоматического наведения на специальный активный отражатель, так и выполнение измерений. При наличии системы управления по радио съемку **может выполнять** только один человек, находясь непосредственно на измеряемой точке, что увеличивает производительность съемки примерно на 80% процентов; оснащение тахеометра безотражательным дальномером позволяет выполнять съемку туннелей, фасадов зданий, карьеров, поверхности дорог и других объектов.

Различия между приборами зачастую лежат в плоскости надежности, технологичности, возможностей программного обеспечения, а также наличия сервисных функций; решающим при их выборе может оказаться:

- наличие лазерного центрира и указателя, русскоязычного меню, функции автонаведения, режима измерений без отражателя, прямого доступа к вводу алфавитно-цифровых кодов непосредственно с приборной панели (без вызова соответствующего меню), беспроводной клавиатуры и графического интерфейса;
- тип операционной системы (Windows CE.Net, PowerTopolite), аккумуляторов, средств передачи информации из внутренней памяти и др.

При использовании электронных приборов нужно внимательно изучить эксплуатационные документы и убедиться, что формируемые в их памяти данные могут быть приняты и обработаны имеющимися программными средствами.

Средства измерения расстояний представлены преимущественно лазерными дальномерами и лазерными рулетками различных конструкций и точности, полностью заменившие дальномерные насадки, свето- и радиодальнометры. Разумеется, гибридные конструкции типа «теодолит + дальномерная насадка» могут соответствовать современ-

ным требованиям к точности и производительности выполнения работ, но они менее функциональны. Поэтому мировые производители давно отказались от производства дальномерных насадок в пользу электронных тахеометров.

Приборы постоянно совершенствуются, на рынке появляются новые приборы, поэтому их эксплуатационные характеристики и функциональные возможности постоянно улучшаются.

§ 10 Методы спутниковых измерений

Научно-технические достижения последних десятилетий позволили создать принципиально новый метод определения координат точек, базирующийся на определении расстояний до спутников. Этот метод ныне завоевал всеобщее признание и нашел широчайшее применение в практике благодаря ряду несомненных преимуществ: высокой точности, всепогодности, отсутствию требований к наличию прямой видимости между смежными пунктами и др.

§ 10.1 Основные принципы и методы спутниковых измерений

Спутниковые навигационные системы первого поколения NNSS (Navy Navigation Satellite System - США, 1964 г.) и ЦИКАДА (СССР, 1967 г.), ориентировались на решение навигационных задач военного характера и базировались на использовании для определения местоположения эффекта Доплера (сдвига частот радиоизлучения движущегося источника). При этом одно наблюдение спутника позволяет написать уравнение одной линии положения, имеющей форму либо *гиперболы* (дифференциальный метод) либо более сложной кривой *изодопы* (интегральный метод). При наблюдении нескольких спутников положение наблюдателя соответствует точке пересечения соответствующих гипербол **или изодоп**.

В спутниковых навигационных системах 2-го поколения, разработка которых началась уже в середине 1970-х годов, измеряются «дальности» (расстояния от определяемой точки до спутников), по которым и определяется местоположение наблюдателя. В результате в 1995 году появились две реализующие эту идею системы: NAVSTAR (NAVigation System with Time And Ranging, США), чаще называемая системой GPS (Global Positioning System), и ГЛОНАСС (**Г**ЛОбальная **Н**Авигационная Спутниковая Система, СССР - Россия). Вскоре система ГЛОНАСС по ряду причин практически прекратила свое существование, но в

2006 - 2007 гг. принято ряд принципиальных решений, реализация которых позволит обеспечить ее использование в 2007 году - на территории России, а в 2009 году - на остальной территории планеты.

В 1999 году было принято решение о создании космической системы Европейского космического агентства Gallileo, что увеличит общую космическую группировку до 80 спутников, **повысит точность** и надежность определений координат объектов.

Сущность спутникового позиционирования заключается в следующем.

Вокруг Земли вращаются спутники (рис. 3.4), непрерывно излучающие радиосигналы и перемещающиеся по нескольким орбитам так, чтобы в любой точке планеты и околоземного пространства можно было принимать сигналы одновременно от нескольких из них. Поскольку параметры орбит спутников непрерывно определяются наземными пунктами слежения (рис. 3.5) и считаются известными, то для определения положения какой-либо точки необходимо:

- установить на точке спутниковый приемник и с его помощью принять радиосигналы от нескольких спутников одновременно (рис. 3.5);
- обработать радиосигналы и вычислить расстояния до спутников;
- вычислить геоцентрические (X, Y, Z) или эллипсоидальные геодезические (B, L, H) координаты точки, решив пространственную линейную засечку.

Поскольку при обработке наблюдений спутников приходится учитывать параметр «время», то для однозначного решения засечки требуется наблюдать 4 спутника, расположенных примерно через 90° по азимуту и под углом наклона $40^\circ - 60^\circ$ к горизонту.



Рис. 3.4. Космическая группировка

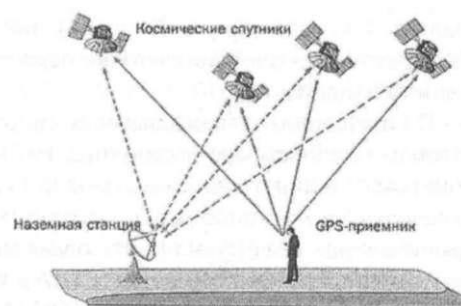


Рис. 3.5. Принципиальная схема позиционирования

Решение задачи усложняется подвижностью взаимодействующих в системе спутников и определяемых точек, что требует учета условий прохождения радиолуча через тропосферу и ионосферу, синхронизации систем отсчета времени, а также решения некоторых других технических вопросов.

§ 10.2 Компоненты системы спутникового позиционирования

Спутниковая система включает сегмент наземного контроля и управления, спутниковую группировку и аппаратуру пользователя.

Сегмент наземного контроля и управления представлен станциями слежения за космическими аппаратами, службой точного времени, главной станцией с вычислительным центром и станцией передачи данных на борт спутника. В задачи этого сегмента входит определение точных орбит каждого спутника, прогнозирование координат спутника (**эфемерид**) на некоторое время и передача их вместе с некоторыми другими данными на борт спутника.

Эфемериды спутников GPS представляются модифицированными элементами орбиты Кеплера, а спутников ГЛОНАСС - геоцентрическими координатами X, Y, Z в системе ПЗ-90 (ПЗ-90.02) и их производными.

Космический сегмент системы включает действующие и резервные спутники, оснащенные солнечными батареями и распределенные по нескольким орбитам. Аппараты сохраняют стабильным заданное положение на орбите, принимают и хранят информацию с наземных станций и непрерывно передают измерительные радиосигналы, в которые включены данные о точном времени, координаты спутника и пр. Причем, дополнительная информация «встраивается» в радиосигнал путем его **модуляции**, т.е. изменения на определенном участке частоты, фазы или амплитуды.

В системах GPS и ГЛОНАСС для этой цели используется особый прием «**манипуляция фазы**», согласно которому фаза несущего сигнала «перескакивает» на 180° в моменты, когда бинарный код 0 встраиваемого сигнала изменяется на 1 или 1 на 0 (рис. 3.6).

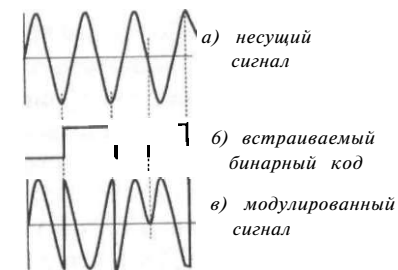


Рис. 3.6. Модулирование сигнала изменением фазы

В приемной аппаратуре эта дополнительная информация выделяется из сигнала путем его **демодуляции**.

На каждом спутнике имеется несколько эталонов частот и времени, аппаратура для приема и передачи радиосигналов, бортовой компьютер и др. Точность хода часов спутника, например, составляет $1 \times 10^{-12} \div 1 \times 10^{-13}$ с (ошибка 0,000003 с в год).

В системе GPS спутники распределены по шести орбитам и расположены на расстоянии 20180 км от поверхности эллипсоида, что обеспечивает прием сигналов в любое время, как минимум, четырех спутников в любой точке Земли. Сигналы, называемые несущими частотами и обозначаемые как L_1 и L_2 , формируются умножением основной частоты эталонного генератора $f_0 = 10,23$ МГц на некоторые константы и используются для точных измерений дальностей фазовым методом, причем

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= f_0 \times f_{L1} = 10,23 \times 154 = 1575,42 \text{ МГц}, & \lambda &= 19,03 \text{ см} \\ L_2 &= f_0 \times f_{L2} = 10,23 \times 120 = 1227,60 \text{ МГц}, & \lambda &= 24,45 \text{ см} \end{aligned} \right\} \cdot$$

В 2010 году должен появиться третий сигнал с частотой $L_5 = 1176,45$ МГц.

Все спутники GPS работают на одних и тех же частотах, но каждый имеет свой код, по которому и распознается среди других.

Для защиты сигнала от несанкционированного доступа для массового пользователя может быть применен режим *селективного доступа* SA (Selective Availability), в котором преднамеренно понижается точность измерений путем искажения эфемерид, показания часов и несущие частоты. Этот режим правительством США отменен 2.05.2000, но может быть введен при возникновении соответствующей ситуации.

Для определения дальностей выполняется модуляция несущих частот L_1 и L_2 бинарными (состоящими из нулей и единиц) кодами C/A и P [22].

Код C/A разработан для гражданских целей и трактуется как грубый (Coarse Acquisition) или гражданский (Civil Application). Он передается только на частоте L_1 циклами по 1023 бита и повторяется каждую миллисекунду, что соответствует длине тактовой волны 293 м.

Код P трактуется как «точный» (Precision) или «защищенный» (Protected) и предназначен для военных приложений. С помощью нелинейной функции $W(t)$ он преобразуется в новый Y-код с длиной тактовой волны 29,3 м и передается на частотах L_1 и L_2 .

Навигационные сообщения, передаваемые на частотах L_1 и L_2 со скоростью 50 бит в секунду, содержат данные о местоположении пере-

дающего спутника (его эфемериды), поправки его часов, информацию о положении и работоспособности других спутников, модель ионосферы и др.

В системе ГЛОНАСС спутники распределены по трем орбитам и расположены на расстоянии 19100 км от поверхности эллипсоида. Для формирования сигналов L_1 и L_2 используется установленный на спутнике эталонный генератор основной частоты $f_0 = 5,11$ МГц, причем, значения несущих частот связаны с основной частотой f_0 и номером спутника k следующими зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= f_0 \times f_{L1} + 0,5625 \times k, & \lambda &= 18,7 \text{ см} \\ L_2 &= f_0 \times f_{L2} + 0,4375 \times k, & \lambda &= 24,1 \text{ см} \end{aligned} \right\} \cdot$$

Сигнал L_1 модулируется кодами ВТ (высокой точности) и СТ (средней точности), а сигнал L_2 - только кодом ВТ. Длина тактовой волны кода ВТ равна 587 м, а кода СТ - 58,7 м.

Аппаратура пользователей представлена спутниковыми приемниками, основные компоненты, технические возможности и особенности конструкции которых рассмотрены ниже (§ 11).

§ 10.3 Содержание и точность спутниковых измерений

Для измерения дальностей при спутниковых измерениях используются методы, базирующиеся на использовании кодовых и фазовых измерений.

Кодовые измерения основаны на сравнении 10-разрядных (в системе GPS) или 9-разрядных (в системе ГЛОНАСС) псевдослучайных бинарных последовательностей (Pseudo Random Noise, PRN), представляющих собой коды C/A (СТ) и P (Y), генерируемые по одним и тем же правилам аппаратурой спутника и приемника [22]. Расстояние между спутником и приемником можно получить либо по времени прохождения сигнала, либо по числу кодовых последовательностей и тактов, используя формулы

$$D = (t + 5t) \times c. \quad (3.1, a)$$

$$D = N \times \lambda + (m \times \Phi) \times \lambda_m. \quad (3.1, б)$$

где $(t + 5t)$ - время прохождения сигнала с учетом несинхронности хода часов спутника и приемника; $c = 299\,792\,458$ м/с - скорость рас-

пространения радиоволн в вакууме; N , λ_{Π} - число кодовых последовательностей и длина кода PRN; m , Φ , λ_m - целое число тактов, доля такта и длина тактовой волны.

Фазовые измерения основаны на определении целого числа радиоволн N , укладываемых на расстоянии между спутником и приемником, и измерении фазы AN . Тогда расстояние между спутником и приемником

$$D = (N + AN) \times X + SB, \quad (3.2)$$

где X - длина волны несущей частоты L_1 или L_2 ; δR - суммарная поправка, учитывающая влияние тропосферы, ионосферы, ошибок эфемерид спутника, несовпадения хода часов спутника и приемника, инструментальных (аппаратных) погрешностей, релятивистских эффектов и др.

Точность измерения разностей фаз составляет около 1%, что при длине волны 20 - 25 см соответствует 2,0 - 2,5 мм и определяет потенциальную точность фазового метода, которая при использовании кодов C/A (СТ) и P (ВТ) оценивается в 2,9 (5,9) - 0,3 (0,6) м соответственно.

Сложность использования уравнения (3.2) заключается в том, что целое число радиоволн N не может быть измерено и определяется в процессе разрешения **неоднозначности**, выполняемого с использованием избыточных фазовых измерений (при приеме сигналов на частотах L_1 и L_2) или по результатам совместной обработки фазовых и кодовых измерений. При использовании двухчастотных приемников разрешение неоднозначности выполняется автоматически: для одночастотных приемников эта операция выполняется в процессе постобработки.

Погрешности спутниковых измерений обусловлены динамическим характером системы в целом, нестабильностью взаимного положения ее элементов и условиями прохождения сигнала. Поэтому точность позиционирования зависит от погрешностей хода часов спутника и приемника, точности определения орбит, инструментальных ошибок приемника, условий прохождения сигнала через ионосферу и тропосферу, отражения радиолуча от объектов местности, геометрического положения спутников и пр. Оценку влияния некоторых из них можно видеть в табл. 3.10 [6].

Таблица 3.10

Источник ошибок	Величина ошибки
Эфемериды спутника*	20 – 50 м
Показания часов спутника	10 – 50 м
Ионосфера (1-частотный приемник)	2 – 100 м
то же (2-частотный приемник)	дм
Тропосферы	дм
Влияние отраженных сигналов	5 см
Шумы при измерениях	1 – 10 м
Задержка сигнала в аппаратуре	мм
Смещение фазового центра антенны	см

С учетом зашумления сигнала в режиме SA

Влияние некоторых источников может быть учтено в процессе обработки измерений, например:

- задержки сигнала, вызванные влиянием ионосферы в диапазоне высот 50 - 500 км и зависящие от частоты радиосигнала, могут быть уменьшены применением двухчастотных приемников;
- компенсация тропосферных задержек выполняется на основе модели этого слоя, по данным навигационных сообщений;
- искажения эфемерид и показаний часов в режиме SA устраняются при использовании методов относительного позиционирования.

Учитываются и иные факторы, снижающих точность определения координат, если модели их влияния с той или иной степенью известны.

Вращение Земли (рис. 3.7). При высоте спутника над поверхностью Земли 20000 км время t прохождения сигнала от спутника до приемника составляет около 0,08 с. За это время планета повернется на угол ω и $1,2''$, а приемник переместится примерно на 40 м.

Расчет поправок к пространственным координатам выполняется по значениям t , ω и трудностей не представляет.

Поправка за высоту антенны. В результате спутниковых измерений определяются координаты фазового центра антенны приемника, которые необходимо редуцировать на определяемую точку. С этой целью измеряется высота фазового центра h и, принимая ее за геодезическую высоту, вычисляются искомые поправки $\delta X, \delta Y, \delta Z$ по формулам (1.2):

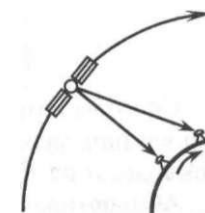


Рис. 3.7. Смещение приемника, вызванное вращением Земли

$$\delta X = -h \cos B \cos L, \delta Y = -h \cos B \sin L, \quad \delta Z = -h \sin B$$

При этом следует иметь в виду, что при центрировании антенны приемника по отвесу из-за несовпадения нормальных высот к поверхностям общеземного эллипсоида WGS-84 и референчного эллипсоида Красовского возникает погрешность, которая при $h = 2$ м и уклонении отвесной линии порядка 20" может достигать 0,2 мм [11].

Аналогично можно вычислить поправки к приращениям координат между двумя пунктами, на которых выполнены наблюдения с высотами фазовых центров h_1 и h_2 .

Влияние многолучевости заключается в том, что антенной принимаются радиолучи как непосредственно от спутника, так и отраженные от земной поверхности, зданий и иных объектов местности. В результате фазовые измерения выполняются по совокупности сигналов, прошедших как кратчайший путь SP , так и более длинные пути SBP и другие (рис. 3.8). В результате дальности, найденные по фазовым измерениям при наблюдении спутника в зените, могут быть искажены на 5 - 6 см и более [6, 11, 22]: при кодовых измерениях погрешность может достигать нескольких метров [22].

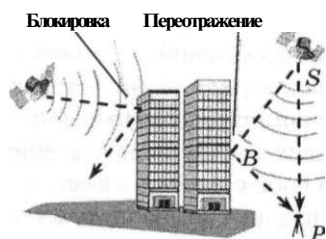


Рис. 3.8. Блокировка и переотражение сигнала от здания (многолучевость)

Релятивистский эффект возникает в связи с большой скоростью перемещения спутника и несовпадением силы тяжести на нем и на поверхности Земли. Он вызывает замедление течения времени (максимум 70 наносекунд) и относительное изменение частоты сигнала. Последнее частично компенсируется смещением основной частоты f_0 , а оставшаяся часть погрешности одинакова для всех каналов спутникового приемника и входит в псевдодальности [22].

§ 10.4 Методы позиционирования

Способы позиционирования, в зависимости от числа используемых при спутниковых измерениях приемников и способа обработки результатов, делят на абсолютные и относительные.

Абсолютное позиционирование предполагает определение геоцентрических координат точки установки спутникового приемника и может быть выполнено способами автономных и дифференциальных определений.

Автономные определения координат (рис. 3.9) используют следующую зависимость между координатами определяемой точки (R_A), наблюдаемого с нее спутника (R_S), псевдодальностью (r_A) и ее искажением (δr):

$$R_A = R_S - r_A + \delta r.$$

Вектор R_A вычисляется из решения четырех нормальных уравнений, связывающих поправки к приближенным координатам определяемой точки и к часам приемника, а оценка их точности выполняется по известной формуле

$$\sigma_i = \mu \sqrt{Q_{ii}},$$

где σ - средняя квадратическая погрешность определяемого неизвестного; Q_{ii} - элемент обратной матрицы; μ - средняя квадратическая ошибка единицы веса.

Отношения σ/μ , называемые геометрическим фактором ($\Gamma\Phi$), представляют собой количественную оценку влияния схемы расположения наблюдаемых спутников и устанавливаются по эфемеридам этих спутников на момент наблюдений. Приведем значения $\Gamma\Phi$, используя английские аббревиатуры их названий [22]:

$$\begin{aligned} \text{GDOP} &= \sqrt{Q_{11} + Q_{22} + Q_{33} + Q_{44}}, \\ \text{PDOP} &= \sqrt{Q_{11} + Q_{22} + Q_{33}}, \quad \text{VDOP} = \sqrt{Q_{33}}, \\ \text{HDOP} &= \sqrt{Q_{11} + Q_{22}}, \quad \text{TDOP} = \sqrt{Q_{44}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

где DOP (Dilution of Precision) означает «уменьшение точности», а первые буквы подсказывают, точность какого именно неизвестного уменьшается: G - все составляющие (Geometrical), P - в пространстве (Position), H - в плане (Horizontal), V - по высоте (Vertical), T - во временных задержках (Time).

Чем больше значение $\Gamma\Phi$, тем хуже точность, и для ее повышения необходимо увеличить число наблюдаемых спутников. Основным является фактор PDOP, для которого приняты следующие вербальные оценки: < 4 - хорошо, 5 - 7 удовлетворительно, > 7 - плохо.

Точность автономных определений зависит от перечисленных выше погрешностей и с учетом искажений, вносимых режимом селективно-

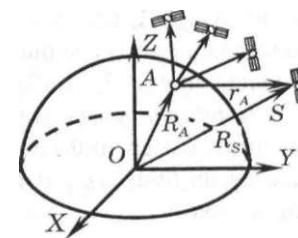


Рис. 3.9. Схема абсолютного позиционирования

го доступа *SA*, составляет 30 - 40 м (табл. 3.10); его отключение снизило ожидаемую среднюю **квадратическую** погрешность однократного определения до 7,5 м [22].

Дифференциальные определения основаны на использовании синхронных измерений несколькими приемниками, часть которых размещается на пунктах с известными координатами и называется базовыми, а другая часть - на определяемых пунктах. Спутниковые измерения на базовых станциях выполняются в непрерывном режиме и позволяют определить для некоторой территории (зоны) дифференциальные поправки к измеренным фазовым дальностям (PDGPS) или найденных по ним координатам (DGPS).

Базовые пункты могут объединяться в так называемые дифференциальные подсистемы (ДПС), которые можно условно разделить на следующие группы:

- локальные ДПС, действующие в радиусе 50 - 200 км и обеспечивающие точность позиционирования на уровне 2,0 - 4,5 м;
- региональные ДПС, действующие в радиусе от 400 км до 2000 км (например, сеть **Startfix** с заявленной погрешностью не более 3 м);
- глобальные и широкозонные ДПС, действующие в радиусе до 5000 км (например, EGNOS, WAAS, MSAS, OmniSTAR и др.);

Найденные при абсолютном позиционировании геоцентрические координаты относятся к эллипсоиду WGS-84 (при наблюдении спутников GPS) или к эллипсоиду ПЗ-90 (при наблюдении спутников ГЛОНАСС). От них можно перейти к геодезической широте *B*, долготе *L* и высоте *H* (§ 10), после чего не представит затруднений перейти к нужному эллипсоиду, а затем - к координатам в нужной проекции; переход к нормальным высотам требует наличия высот квазигеоида, а к ортометрическим высотам - высот геоида.

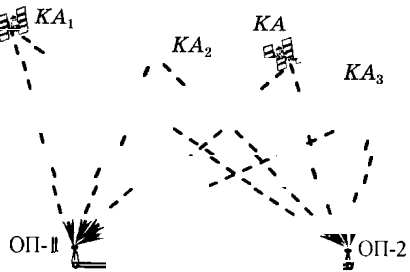


Рис. 3.10. Наблюдение спутников с двух наземных станций

Относительное позиционирование по праву считается наиболее точным и, как и в дифференциальном способе, использует два синхронно работающих приемника (рис. 3.10). Один из приемников установлен на опорном пункте ОП-1 и называется *базовым* или *референчным* (base or reference station), а второй размещается над определяемой **точкой** ОП-2 и называется *ровером* (rover). При об-

работке результатов измерений формируются **пространственные** векторы, определяющие положение ровера относительно базового пункта. Применение специальных приемов позволяет компенсировать наиболее значимые погрешности измеренных дальностей и уменьшить влияние остальных источников ошибок до приемлемых пределов.

В практике используют несколько режимов относительных определений (табл. 3.11), которые можно разделить на статические (когда оба пункта неподвижны) и кинематические (когда ровер перемещается).

Режим статики является наиболее точным, но трудоемким и используется при выполнении всех высокоточных геодезических работ. Точность позиционирования зависит от продолжительности измерений (т.е. от числа измеренных дальностей): измерения в течение 5 минут обеспечивают дециметровую точность определений; при продолжительности измерений 1 час погрешность уменьшается до 5 мм в плане и 10 мм по высоте [22]. Обычно время наблюдений занимает от 40 минут до нескольких часов, в зависимости от требуемой точности, расположения спутников, состояния атмосферы и др.

Таблица 3.11

Режим	Характеристики	Точность*, мм
Статика	Наблюдения в течение от 40 минут до нескольких часов, базисные линии > 10 км	$\pm (0,1 + 1 \times 10^{-6} D)$
Быстрая статика	Малое время наблюдения (от 5 до 30 мин), короткие базисные линии (менее 10 км)	$\pm (5 + 1 \times 10^{-6} D)$
Кинематика	Определение положения точек при перемещении ровера (в движении или с короткими остановками)	$\pm (10 + 20 + 2 \times 10^{-6} D)$
Стой-иди	1-минутные остановки на определяемых пунктах	$\pm (5 + 1 \times 10^{-6} D)$
RTK	Постоянная связь с базовой станцией по радиомодему и определение координат в реальном масштабе времени	$\pm (5 + 1 \times 10^{-6} D)$
OTF (на лету)	Определение координат центров фотографирования в полете 2-частотным приемником	100 – 150

* *D* - расстояние между базовым и определяемым пунктами.

Режим быстрой статики представляет собой разновидность статического режима, когда продолжительность измерений за счет ускорения решения неоднозначности сокращается и при наблюдении пяти спутников уменьшается до 15 минут, а шести спутников - до 10 минут. Режим имеет несколько разновидностей, отличающихся программой

работ. Так, *режим реокупации* требует приема сигналов в течение 10 минут, после чего приемник перемещается на другие определяемые пункты; по истечении часа подвижный приемник возвращается на прежние пункты и продолжается сбор данных.

Режим кинематики используется при выполнении съемочных работ (в том числе аэрофотосъемки), когда один из приемников размещается на опорном пункте, а второй (одночастотный или двухчастотный) непрерывно перемещается (в необходимых случаях - с приостановкой на определяемых точках) без потери принимаемого сигнала (иначе необходимо выполнить инициализацию приемника). Режим имеет ряд разновидностей:

- *стой - иди* (Stop and Go) с короткими остановками на определяемых точках, координаты которых определяются при постобработке;
- *кинематики в реальном времени* (Real Time Kinematics — RTK) предполагает оснащение приемников радиомодемами и определение координат точек установки ровера в течение нескольких секунд с учетом поправок, полученных по радиомодему с базовой станции;
- *OTF* (On The Fly - на лету) используется для определения координат центров фотографирования двухчастотными приемниками при аэрофотосъемке с постоянным приемом сигналов спутников.

Одновременное наблюдение спутников ГЛОНАСС и GPS позволяет повысить точность позиционирования и сократить время измерений.

§ 11 Спутниковые приемники

Любой спутниковый приемник в рабочем состоянии принимает и обрабатывает сигналы спутников, расшифровывает навигационные сообщения и преобразует полученную информацию в значения координат, скорости и времени. В нем можно выделить несколько устройств: антенну с соответствующей электроникой, радиочастотный блок, электронную систему слежения, навигационный микропроцессор и блок питания. Иногда приемник дополняется устройством для хранения и передачи данных [1].

Антенна приемника предназначена для приема радиоволн с противоположной круговой поляризацией на частотах L_1 и (или) L_2 от спутников, находящихся выше горизонта. Форма и размеры антенны определяют ее способность улавливать сигналы в определенной полосе частот, диаграмму направленности, способность исключать или ослаблять влияние многолучевости и пр. Наиболее распространенными являются микрополосковые антенны, отличающиеся простотой и жесткостью конструкции, невысокой стоимостью, малой массой и размерами.

Радиочастотный блок предназначен для преобразования принятой антенной радиочастоты в более низкую (промежуточную) частоту, более эффективную для использования другими блоками приемника.

Система слежения осуществляет выделение сигналов определенных спутников и идентифицирует их по индивидуальному дальномерному C/A-коду (GPS) или уникальному номеру (ГЛОНАСС), «захватывает» изменяющийся по частоте или времени сигнал, принимает соответствующие навигационные сообщения, расшифровывает их и выполняет необходимые измерения.

Микропроцессор приемника осуществляет обработку преобразованного в цифровую форму сигнала и поддержку системы слежения. В частности, им обеспечивается: начальный захват сигналов спутника, отслеживание кодовых и фазовых сигналов, извлечение навигационного сообщения, контроль текущих состояний спутников созвездия с выдачей соответствующих сообщений, фильтрация сигналов для ослабления помех, прием через специальный радиоканал поправок в псевдодальности, определение координат фазового центра антенны, выполнение других оперативных расчетов.

Темп сбора данных (псевдодальностей и фазы несущей на одной или двух частотах с отсчетами времени, эфемерид и параметров хода часов спутника, метеорологических данных и пр.), и их сохранения во внутренних форматах определяется пользователем в зависимости от режима измерений. Для статического режима интервал записи устанавливается, как правило, в 15 - 30 с, в режиме кинематики - от 0,5 до 5 с.

Экспорт результатов спутниковых измерений в обрабатывающие системы осуществляется в обменном формате ГЛОНАСС и GPS-данных RINEX (Receiver INdependent EXchange), предложенном еще в 1989 году и представляющем собой совокупность трех ASCII - файлов, содержащих GPS-измерения, метеорологические данные и навигационные сообщения.

Приемники комплектуются встроенными или отдельными антеннами, аккумуляторами, контроллерами, портами ввода-вывода (в том числе инфракрасными), встроенными или внешними радиомодемами, обеспечивающими возможность работы в реальном времени (режим RTK) и др.

В настоящее время спутниковые приемники производят почти 70 фирм, наиболее известными из которых являются Javad Navigation Systems, Leica Geosystems, NovAtel, Sokkia, Topcon, Trimble Navigation и пр. Активизируется их производство в России и Китае. Считается, на рынке ежегодно появляется около миллиона приемников более чем 100 моделей, которые классифицируются по [1]:

- *спутниковым системам.* Подавляющее большинство приемников принимает сигналы только одной системы (GPS, ГЛОНАСС), двух систем (GPS, ГЛОНАСС) или даже трех (GPS, ГЛОНАСС и Galileo). Отдельные приемники (например, HiPer фирмы Топсон) снабжены функцией Cinderella («Золушка»), которая в каждый второй вторник превращает на 24 часа одночастотный приемник в двухчастотный и двухсистемный;

- *числу принимаемых частот* (одночастотные, принимающие сигналы только на частоте L_1 , и двухчастотные, способные принимать сигналы на частотах L_1 и L_2). В связи с ожидаемым введением третьей частоты L_5 некоторые приемники (например, R8 фирмы Trimble) уже сейчас готовы к ее приему. Табл. 3.12 отражает основные преимущества одночастотных и двухчастотных приемников.

Таблица 3.12

Основные преимущества спутниковых приемников	
двухчастотных	одночастотных
- исключение влияния ионосферы и возможность значительных удалений от базовой станции при относительных определениях; - более высокая производительность работ на станции (продолжительность измерений в два раза меньше, чем при использовании одночастотного приемника); - более высокая точность и достоверность измерений; - возможность автоматического разрешения фазовой неоднозначности в движении (режим OTF); - возможность использования режима кинематики в реальном времени (режим RTK).	- относительно низкая стоимость (примерно в три раза ниже, чем двухчастотного); - простота управления (1-частотный приемник часто имеет одну кнопку управления); - компактность и малый вес; - относительно малое энергопотребление; - минимальные требования к объему памяти.

- *параметрам наблюдений* (кодовые, ориентированные на работу с C/A-кодом или P-кодом, и кодово-фазовые, использующие дальноммерные кода C/A и фазовые измерения);

- *числу каналов*, определяющих количество одновременно наблюдаемых спутников. В односистемных приемниках число каналов колеблется от шести до двенадцати на каждую частоту; в двухсистемных приемниках их число достигает семидесяти;

- *назначению* - в зависимости от точности позиционирования и конструктивных особенностей приемники ориентируются на задачи геодезии, навигации, геологии, различных диспетчерских служб, телекоммуникации, ГИС-приложений, военные задачи и др.

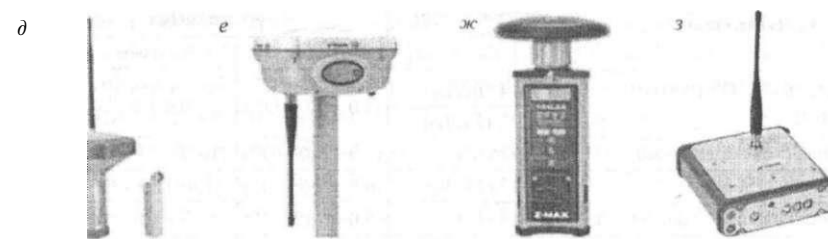


Рис. 3.11 Спутниковые приемники: одночастотные Leica GX 1210 (а), Sokkia Stratus (б), Thales Promark3 (в), Trimble 5700 L1 (г); двухчастотные Topcon GR-3 (д), Trimble R8 (е), Thales Navigation Z-max (ж), Topcon HiPer+ (з)

Спутниковые приемники характеризуются также диапазоном рабочих температур ($-30 \dots +50^\circ\text{C}$), продолжительностью «холодного» и «теплого» старта⁴ (не более 60 с и не менее 1 с соответственно), возможностью производства работ в режиме реального времени RTK, использования данных, получаемых с помощью широкозонных (глобальных), региональных и локальных дифференциальных систем и др.

Технические характеристики некоторых моделей приемников даны в табл. 3.13.

В общем случае при выборе спутникового приемника учитывают:

- возможные удаления приемника от базовой станции (при расстояниях более 20 км предпочтительнее двухчастотные);
- необходимость режима навигации (некоторые модели потребуют приобретения для этой цели дополнительного контроллера);
- характер предстоящих работ (геодезические и топографические работы допускают применение разных приемников);
- необходимость получения результатов позиционирования в реальном времени и с сантиметровой точностью;

⁴ При «холодном» старте в приемнике нет альманаха, эфемерид спутников, координат начального положения и текущего времени; при «теплом» старте в приемнике нет эфемерид.

- возможность и необходимость модернизации одночастотного приемника до двухчастотного, а односистемного - до двухсистемного;
- квалификацию исполнителя (эксплуатация двухчастотного приемника достаточно сложна);
- бюджет организации (двухчастотный приемник лучше, но дороже).

Таблица 3.13

Приемник, производитель	Системы, частоты и каналы	Точность позиционирования в режиме статики (мм)		Масса, кг
		в плане	по высоте	
GX1220GG, GX1230 GG (Leica)	GPS: 14 (L_1/L_2) GL ¹ : 12 (L_1/L_2)	(5,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	(10,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	2,31
Stratus (Sokkia, NovAtel)	GPS: 12 (L_1)	(5,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	(10,0 + 2,0 × D ⁻⁶)	1,60
GSR 2600 (Sokkia)	GPS: 12 (L_1/L_2)	(0,5 + 1,0 × D ⁻⁶)	(1,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	1,30
Promark3 (Thales Navigation)	GPS: 14 (L_1)	(5,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	(10,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	0,93
5700L1 (Trimble)	GPS: 12 (L_1)	(5,0 + 0,5 × D ⁻⁶)	(5,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	2,26
5700L2 (Trimble)	GPS: 12 (L_1/L_2)			1,80
R6 (Trimble)	GPS, GL: 72 (L_1/L_2)			1,35
R7 (Trimble)	GPS: 24 ($L_1/L_2/L_5$)			1,30
R8 (Trimble)	GPS, GL: 72 ($L_1/12L_2/L_5$)			1,35
GR-3 (Topcon)	GPS, GL ¹ , Gal ¹ : 72 (L_1/L_2)	(5,0 + 0,5 × D ⁻⁶)	(5,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	1,78
Smart 6100IS (NovAtel)	GPS 24 (L_1/L_2)	(5,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	(10,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	1,75
Z-max (Thales Navigation)	GPS 36 (L_1/L_2)	(5,0 + 0,5 × D ⁻⁶)	(10,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	1,89
Z-xtreme (Thales Navigation)	GPS 36 (L_1/L_2)	(5,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	(5,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	1,7
MaxorGGD, Prego (Javad Navigation Systems)	GPS 20 (L_1/L_2) GL ¹ : 20 (L_1/L_2) ²	(3,0 + 1,0 × D ⁻⁶)	(5,0 + 1,5 × D ⁻⁶)	1,90
HiPer+L1, HiPer+, HiPer XT (Topcon)	GPS: 40 (L_1) ² GPS, GL ³	(3,0 + 0,5 × D ⁻⁶)	(5,0 + 0,5 × D ⁻⁶)	1,70

¹ GL – ГЛОНАСС, Gal – Galileo.

² В дни Cinderella 20 (L_1/L_2).

³ Дополнительные каналы: GPS, 20 (L_1/L_2), GPS+GL (20L₁) или GPS+GL 20 (L_1, L_2).

Обработка данных представляет собой важный этап работы, определяет точность конечных результатов, и может быть разделена на несколько этапов, каждый из них может выполняться либо специальной программой, либо модулем большого пакета программ.

Применяемые программы различаются по своим возможностям, ориентации на типы или модели приемников, стоимости и пр. Наиболее из-

вестными из них являются программы постобработки *Pinnacle*, *Ensemble*, *Trimble* и др.

Например, обработка спутниковых измерений с помощью программного обеспечения фирмы Trimble включает выполнение основных задач:

- выбор режима обработки данных; при этом имеется возможность выбора баз (базисов) и их комбинаций, объединения различных сессий наблюдений и др.;
- преобразование данных об эфемеридах, полученных в навигационном сообщении, в координаты спутников для конкретных эпох наблюдений. В процессе постобработки (спустя несколько часов или суток) эфемериды уточняются по данным Internet или из иных источников (например, по подписке);
- определение пространственных координат концов базовых векторов по данным кодовых измерений, расчет поправки часов приемника путем обработки псевдодальностей до спутников, по возможности - учет дифференциальных поправок в режиме DGPS;
- обработка фазовых данных (в частности, комбинации их с кодовыми данными, с доплеровской информацией, использование первых, вторых и третьих разностей фаз для частот L_1 и L_2 и др.);
- вычисление для выбранного режима обработки ковариационной матрицы, элементы которой используются для оценки точности GPS-измерений;
- оценка определяемых параметров (векторов баз, целочисленных неоднозначностей, параметров атмосферы, спутниковых орбит).

Спутниковая аппаратура непрерывно совершенствуется, и на рынке появляются новые, все более совершенные модели.

Глава 4

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ

В практике геодезических вычислений нередко возникает необходимость различного рода координатных преобразований, связанных с перевычислением их из одной системы в другую, отыскание ключей их связи с другой (например, государственной) и др. Ниже рассмотрены общие принципы таких вычислений и используемые для этой цели средства.

§ 12 Перевычисление геоцентрических координат

Рассматриваемые преобразования выполняются при переходе на новый эллипсоид (например, из ПЗ-90 к WGS-84) или к иной пространственной координатной системе (например, от СК-42 к СК-95). В общем случае такой переход может быть выполнен на основе преобразований Гельмерта (по семи параметрам) или Молоденского (рис. 4.1):

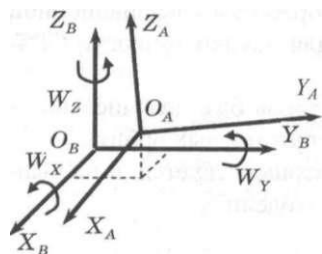


Рис. 4.1. Связь пространственных систем координат

Преобразования Гельмерта основаны на применении общих правил перехода от одной пространственной координатной системы (А) к другой (В) пространственной координатной системе с учетом семи параметров: смещений по трем координатным осям, углов поворота вокруг них и масштабного коэффициента. Эта классическая линейная модель, иногда называемая моделью Бурша, описывается следующими дифференциальными формулами, справедливыми для малых углов поворота:

$$\begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{pmatrix} + (1 + m) \times \begin{pmatrix} 1 & w_Z & 0 \\ -w_Z & 1 & w_X \\ w_Y & -w_X & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

где $\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$ - смещение начала одной координатной системы (А) относительно другой (В); w_X, w_Y, w_Z - углы Кардано между координатными осями систем А и В в соответствующих координатных плоскостях; m - масштабный коэффициент в единицах шестого знака.

Значения углов Кардано обычно не превышает одной - трех секунд, а масштабного коэффициента - нескольких единиц.

Преобразование плоских прямоугольных координат x, y (например, в проекции Гаусса-Крюгера или UTM) при изменении параметров обобщенного или референсного эллипсоида выполняется в таком порядке:

- вычисляют геодезические координаты B, L, H по формулам (2.4) с учетом параметров исходного эллипсоида;
- по формулам (1.2) находят геоцентрические координаты X, Y, Z , отнесенные к тому же эллипсоиду;
- по известным параметрам связи исходной и искомой геоцентрических координатных систем ($w_X, w_Y, w_Z, \Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0, m$) по формулам (4.1) преобразуют геоцентрические координаты X, Y, Z на новый эллипсоид;
- по геоцентрическим координатам, используя формулы (1.3), вычисляют геодезические координаты B, L, H , отнесенные к искомому эллипсоиду;
- находят плоские прямоугольные координаты на новом эллипсоиде, используя формулы (2.3).

Указанные преобразования можно представить схематически в виде следующей цепочки:

$$(x, y)_B \Leftarrow (B, L, H)_B \Leftarrow (X, Y, Z)_B \Leftarrow (X, Y, Z)_A \Leftarrow (B, L, H)_A \Leftarrow (x, y)_A \quad (4.2)$$

Коэффициенты, используемые в формулах (2.3) и (2.4), должны быть вычислены по параметрам соответствующего эллипсоида.

Преобразования Молоденского предусматривают прямое определение геодезических широт, долгот и высот, минуя определение пространственных прямоугольных координат X, Y, Z . В этом случае к перечисленным выше семи параметрам добавляется изменение большой полуоси эллипсоида (Δa) и его сжатия (Δf). Обобщенные формулы такого преобразования имеют вид [1, 2]

$$\begin{aligned} B_B &= B_A + F_X(\Delta a, \Delta \alpha, w_X, w_Y, w_Z, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z, m, B_A, L_A, H_A), \\ L_B &= L_A + F_Y(\Delta a, \Delta \alpha, w_X, w_Y, w_Z, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z, m, B_A, L_A, H_A), \\ H_B &= H_A + F_Z(\Delta a, \Delta \alpha, w_X, w_Y, w_Z, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z, m, B_A, L_A, H_A) \end{aligned} \quad (4.3)$$

где в нижние индексы определяют принадлежность соответствующей переменной к исходной (А) или выходной (В) системе.

С учетом этого схема перевычисления плоских прямоугольных координат из системы А в систему В на новом эллипсоиде на основе преобразований Молоденского имеет вид

$$(x, y)_B \Leftarrow (B, L, H)_B \Leftarrow (B, L, H)_A \Leftarrow (x, y)_A \quad (4.4)$$

В обоих случаях геодезические высоты H определяются по формулам (1.9), а необходимые для этого высоты геоида или квазигеоида над эллипсоидом (в зависимости от того, использованы ли нормальные высоты или ортометрические) – по соответствующим картам. Заметим, что геодезические высоты могут быть приняты равными нулю лишь в том случае, если параметры эллипсоида и его ориентирование в теле Земли остаются неизменными. В других случаях этот параметр является обязательным.

Формулы (4.3) широко используются программным обеспечением спутниковых приемников.

Значения параметров связи некоторых пространственных (геоцентрических) координатных систем приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Связь систем координат	Параметры связи координатных систем						
	$AX, \text{ м}$	$AY, \text{ м}$	$AZ, \text{ м}$	$W_X(^{\circ})$	$W_Y(^{\circ})$	$W_Z(^{\circ})$	$m \text{ (ppm)}$
СК-42 → ПЗ-90	24,10	-139,94	-74,96	0,02	-0,38	-0,85	0,15
СК-42 → СК-95	-1,80	+9,00	-6,80	0,02	-0,38	-0,85	0,15
СК-42 → WGS-84	24,12	-139,92	-74,43	0,03	-0,38	-1,20	-0,15
ПЗ-90 → WGS-84	-0,01	0,02	0,53	-0,01	0,00	0,35	0,00
ПЗ-90.02 → WGS-84	0	0	0	0	0	0	0
ПЗ-90 → СК-95	-25,90	130,94	81,76	0,00	0,00	0,00	0,00

Формулы (4.1) и (4.3) используются в случае, когда параметры связи двух геоцентрических координатных систем известны, и требуется лишь перевычислить геоцентрические (X, Y, Z) или эллипсоидальные (B, L, H) координаты из одной системы в другую.

Если же параметры связи координатных систем неизвестны, то они могут быть найдены по координатам нескольких точек с известными координатами в обеих системах. С этой целью исходные уравнения (4.1) или (4.3) приводятся к линейному виду путем разложения в ряд Тейлора и составляются по три уравнения поправок для каждой исходной точки. Совместное их решение методом наименьших квадратов приводит к семи (для преобразований Гельмерта) или девяти (для преобразований Молоденского) нормальным уравнениям, решение которых дает искомые неизвестные и обеспечивает возможность оценки точности их уравненных значений.

Исследователи отмечают, что высокая точность трансформирования достигается только при преобразовании точных глобальных коор-

динатных систем. Что же касается локальных или референчных систем, то параметры преобразования определяются по ограниченной выборке опорных точек и не могут учитывать локальных нелинейных искажений в сетях, так что точность перехода, например, от СК-42 к ПЗ-90 оценивается в 2 - 4 м, а к WGS-84 – в 5 - 7 м [1].

§ 13 Перевычисление координат из одной зоны проекции Гаусса-Крюгера в другую

В практике нередко случаи, когда опорная сеть, создаваемая для обеспечения топографической съемки, располагается в двух координатных зонах, и для выполнения уравнительных вычислений необходимо перевычислить координаты пунктов из одной зоны в другую.

Наиболее точный универсальный способ решения задачи заключается в следующем. Сначала по координатам точки в зоне A по формулам (2.4) определяют геодезические координаты B и L , после чего по формулам (2.3) вычисляются плоские прямоугольные координаты x, y с использованием удаления l относительной осевого меридиана смежной зоны B . Схематически эти преобразования можно представить в следующем виде:

$$(x, y) \Leftarrow (B, l)_B \Leftarrow (B, L) \Leftarrow (B, l)_A \Leftarrow (x, y)_A. \quad (4.5)$$

Применению формул (2.4) предшествует приведение исходных координат к осевому меридиану и экватору, что требует исключения из абсцисс и ординат установленных для них смещений (§§ 5, 7.3).

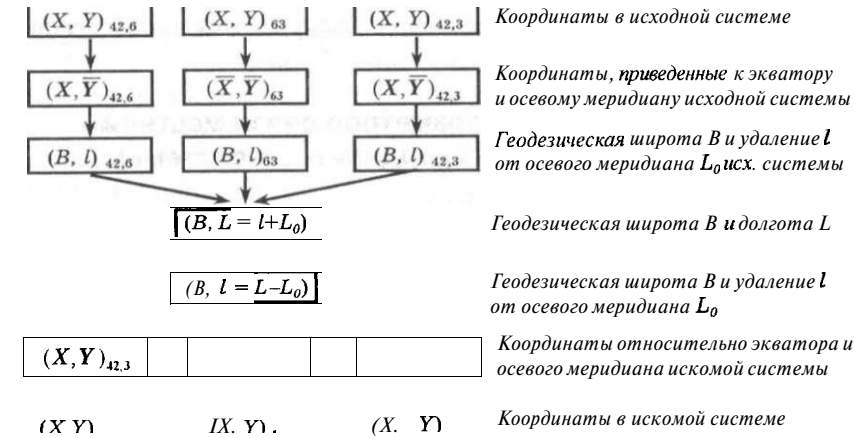


Рис. 4.2. Схемы преобразования плоских прямоугольных координат

Аналогично преобразуются и вычисленные по формулам (2.3) плоские прямоугольные координаты в искомой системе. Эти обстоятельства учтены на схеме вычислений, отражающей особенности преобразования конкретных координатных систем (рис. 4.2).

Рассмотренные преобразования не требуют определения геодезической высоты точки, и, по существу, выполняется перевычисление координат точки пересечения поверхности эллипсоида с нормалью к ней.

§ 14 Перевычисление из государственной системы координат в местную и обратно

Взаимные преобразования местной и государственной координатной систем при наличии ключей связи между ними выполняются в полном соответствии с формулами (2.6) - (2.13). Так, если при установлении МСК использованы формулы ортогональных (2.6) или конформных (2.10) преобразований, а исходные координаты заданы в 3-градусной или 6-градусной зоне СК-42 или в СК-63, то вычисления выполняются в следующем порядке:

- преобразование координат точек из исходной системы в образующую по формулам (2.3), (2.4) или по схемам (4.5) и рис. 4.2;
- вычисление искомых координат в местной системе по формулам (2.6) или (2.10) по известным ключам $x_0, y_0, X_0, Y_0, \varphi, \tau$ (при этом некоторые из них могут быть равны нулю).

В случаях, когда местная система координат создана путем изменения параметров проецирования или образования новой координатной зоны (§§ 7.3, 7.4), то преобразования выполняются в соответствии со схемами (2.12) и (2.13).

§ 15 Определение параметров связи местной и государственной координатных систем

Относительно простая техническая задача преобразования из государственной системы координат в местную систему становится сложной научно-технической задачей, если ключи связи между ними неизвестны и подлежат установлению. В тех же случаях, когда указанные преобразования выполняются с целью формирования границ земельных участках Государственного реестра недвижимости, то эта задача зачастую трансформируется в юридическую.

В самом деле, при установлении связи двух координатных систем может быть использовано 4 – 5 моделей преобразования (§ 7.1). Если

учесть, что в качестве образующей системы может быть принята одна из трех систем, а также возможность установления новой координатной зоны или изменения параметров проецирования, то число вариантов связи может достигать двадцати, и шансы угадать требуемый вариант практически равны нулю. Отмеченное обстоятельство усугубляется наличием достаточно существенных региональных (см. рис. 2.4) и локальных деформаций государственной геодезической сети республики, следствием которых является зависимость ключей связи координатных систем от того, по каким именно пунктам образующей системы они определены.

Ранее было рассмотрено два подхода к установлению местной системы координат, основанные на использовании методов чисто геометрических (§§ 7.1, 7.2) и картографических преобразований (§§ 7.3, 7.4). Эти же подходы целесообразно применить и для восстановления параметров связи местной и государственной координатных систем.

Геометрические преобразования применяются для восстановления параметров связи местной и государственной координатной систем в случаях, когда МСК устанавливалась на основе ортогональной или конформной модели, т.е. путем смещения начала координат и поворота ее осей. В этом случае задача решается в три этапа:

- определение модели преобразования и выбор неизвестных (параметров связи координатных систем);
- вычисление параметров связи координатных систем по трем – четырем точкам с известными координатами в обеих системах;
- перевычисления координат точек в соответствии с избранной моделью преобразования и найденными параметрами связи систем.

Модель преобразования, в виду отсутствия каких-либо сведений о МСК (в том числе наименования образующей системы и числа параметров связи координатных систем), в подавляющем большинстве случаев выбирается между ортогональной моделью, аффинной и, реже, полиномиальной, которые описываются наиболее простыми уравнениями с четырьмя, шестью или десятью параметрами.

Ортогональная модель является наиболее строгой и жесткой, поскольку ее применение обеспечивает разворот осей абсцисс и ординат исходной системы на одинаковые углы, а также равенство их масштабов. Модель описывается уравнениями с четырьмя неизвестными

$$\begin{aligned} x &= a_0 + (a_1 \Delta X - a_2 \Delta Y) \tau, \\ y &= b_0 + (a_2 \Delta X + a_1 \Delta Y) \tau \end{aligned} \quad (4.6, a)$$

где $\Delta X = X - X_0$, $\Delta Y = Y - Y_0$.

Заметим, что уравнения (4.6, а) при $a_1 = \Delta X \times \cos \varphi$, $a_2 = \Delta Y \times \sin \varphi$, $a_0 = x$ и $b_0 = y$, обращаются в уравнения (2.6).

Аффинная модель описывается уравнениями, включающими шесть неизвестных (параметров)

$$\begin{cases} x = a_0 + a_1 \Delta X + a_2 \Delta Y, \\ y = b_0 + b_1 \Delta X + b_2 \Delta Y \end{cases} \quad (4.6, б)$$

и обращается в ортогональную модель при $a_1 = b_2$ и $b_1 = -a_2$.

Поскольку аффинная модель допускает разворот осей абсцисс и ординат исходной системы на разные углы и разный масштаб их изображения, ее применение возможно только при наличии избыточных исходных и контрольных пунктов, по которым проверяется корректность найденных параметров преобразования.

Полиномиальная модель является нелинейной, обеспечивает независимое преобразование абсцисс и ординат и описывается уравнениями

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1 \Delta X + a_2 \Delta Y + a_3 \Delta X \Delta Y + a_4 \Delta X^2, \\ y &= b_0 + b_1 \Delta X + b_2 \Delta Y + b_3 \Delta X \Delta Y + b_5 \Delta X^2 \end{aligned} \quad (4.6, в)$$

Рассматриваемая модель применяется крайне редко, поскольку:

- величины остаточных расхождений на исходных точках, по которым найдены параметры преобразования, никак не связаны с точностью их определения;
- несимметричное размещение исходных точек предполагает последующую экстраполяцию параметров преобразования, что весьма нежелательно и может служить источником ошибок;
- ошибки координат исходных точек могут привести к существенным **ИСКАЖЕНИЯМ** и деформации сети в местной системе.

Одна исходная точка позволяет составить по два уравнения (4.6, а) — (4.6, в), и для отыскания неизвестных необходимо две, три или пять таких точек соответственно. Однако, поскольку в этих случаях число уравнений равно числу неизвестных, найденные решения окажутся бесконтрольными, и любые ошибки координат войдут в неизвестные. В связи с этим практически число исходных точек должно быть равно трем, четырем и шести точкам при использовании ортогональной, аффинной и полиномиальной моделей соответственно.

Вычисление параметров преобразования выполняется методом наименьших квадратов, под условием $[vv] = \min$.

С технической точки зрения рассматриваемая задача достаточно проста и сводится к последовательному выполнению следующих операций:

- приведение исходных уравнений избранной модели преобразования (4.6, а), (4.6, б) или (4.6, в) к линейному виду;
- определение начальных значений неизвестных;
- составление двух уравнений поправок для каждой опорной точки с известными координатами в двух системах и нормальных уравнений;
- решение нормальных уравнений методом наименьших квадратов.

Неизвестные определяются методом приближений, пока поправки к ним или остаточные расхождения координат исходных точек не будут меньше заданного допуска.

Проблема определения параметров преобразования координатных систем заключается в оценке полученных остаточных расхождений координат опорных точек, ибо важно, с одной стороны, добиться приемлемого согласования координат, а с другой - исключить возможность деформации трансформируемых координат, вероятность появления которой достаточно высока, особенно при использовании координат в системе СК-42. Тем более что иногда в число исходных неоправданно включаются точки границ смежных участков, что позволяет добиться приемлемого согласования координат общих точек, но является источником дополнительных локальных деформаций границ объектов не-движимости.

Заметим, что использование аффинной и полиномиальной моделей практически всегда обеспечивает получение наименьших остаточных расхождений координат исходных точек и более высокую (в сравнении с ортогональной моделью) вероятность деформации. Поэтому обязательным условием их применения является использование избыточного числа опорных точек, что повышает надежность оценки результатов.

Найденные параметры едва ли можно считать восстановленными ключами связи государственной и местной системы координат, так как они:

- вычислены не для всей территории населенного пункта, а для его локального участка, ограниченного исходными точками;
- используются для перевычисления ограниченного числа точек, в то время как остальные геодезические пункты остаются вычисленными по другим параметрам;
- зачастую, особенно при наличии локальных деформаций АГС, зависят от выбранных опорных точек.

Перевычислений координат выполняется в соответствии с избранной моделью преобразования и найденными параметрами, т.е. по формулам (4.6, а), (4.6, б) или (4.6, в).

Картографические преобразования применяются для восстановления параметров связи государственной и местной координатных

систем в случаях, когда МСК устанавливалась путем создания координатной зоны с новым осевым меридианом и смещением оси абсцисс, т.е. по правилам, принятым для СК-63.

Сущность способа определения ключей пересчета из образующей системы в новую координатную зону заключается в сравнении геодезических азимутов A , найденных по координатам точек в образующей (например, СК-42) и местной системах. При этом возникает очевидное условие [3]:

$$A_{СК-42} = \alpha_{СК-42} + \gamma_{СК-42} + \delta_{СК-42} = A_{МСК} = \alpha_{МСК} + \gamma_{МСК} + \delta_{МСК}, \quad (4.7)$$

где α - дирекционный угол; γ - сближение меридианов; δ - поправка за кривизну изображения геодезической линии в проекции Гаусса-Крюгера; нижний индекс определяет координатную систему, в которой вычислена соответствующая переменная.

Сближение меридианов представим как функцию широты точки (B), ее удаления от осевого меридиана (l) и параметров эллипсоида (α, a)

$$\gamma = l \times F(B, l, \alpha, a). \quad (4.8)$$

Подстановка этого выражения в (4.7) позволяет составить для каждой пары точек уравнение вида

$$l = [A_{СК-42} - \alpha_{МСК} - \delta_{МСК}] / F(B, l, \alpha, a), \quad (4.9)$$

которое решается методом приближений.

Теперь, зная долготу исходной точки, легко вычислить долготу L_0 осевого меридиана МСК, после чего не сложно найти плоские прямоугольные координаты x, y по формулам (2.3) и смещение абсцисс ΔX .

Искомые ключами МСК являются усредненные значения долготы осевого меридиана L_0 и величины смещения ΔX .

§ 16 Программные средства преобразования координатных систем

Для определения параметров связи координатных систем и преобразования координат точек предприятия и организации республики широко используют программу ТРАНСКОР комплекса CREDO и ряд собственных разработок. Последние, в большинстве случаев, не имеют полной документации, не сертифицированы и, как правило, не тиражируются. По этой причине ниже рассмотрены возможности и специфика координатных преобразований только программы ТРАНСКОР комплекса CREDO.

Эта программа является частью комплекса CREDO, к основным задачам которого можно отнести полную математическую обработку результатов полевых измерений, создание цифровой модели местности и решение на ее основе различных задач (в частности - построение топографического плана, формирование материалов и документов при установлении границ земельных участков и пр.). Программа ТРАНСКОР предназначена для преобразования геоцентрических, геодезических (эллипсоидальных) и плоских прямоугольных координат по известным параметрам связи, а также определение этих параметров по группам пунктов с известными координатами в той и другой системах. Она поддерживает следующие координатные системы:

- *геоцентрические* (пространственные прямоугольные), различающиеся параметрами и ориентацией эллипсоида в теле Земли;
- *геодезические* (эллипсоидальные), определяемые параметрами эллипсоида и ориентацией его координатных осей;
- *плоские прямоугольные*, основанные на использовании поперечно-цилиндрических проекций Меркатора (Гаусса-Крюгера, UTM) и определяемые выбором параметров эллипсоида, ориентацией его координатных осей, способом проецирования и др.;
- *местные*, установленные для определенной территории и связанные с государственной системой координат некоторыми параметрами (ключами).

Программа обеспечивает возможность перевычисления координат из одной системы в другую, определение параметров их связи и некоторые иных функций.

В общем случае порядок обработки информации включает [24]:

- создание нового проекта или открытие существующего;
- начальные установки, включающие определение рабочих координатных систем и описания их параметров;
- импорт данных или их ввод с помощью табличного редактора;
- обработку данных, содержание которой определяется составом исходной информации и сущностью решаемой задачи;
- печать результатов обработки и(или) экспорт.

Управление работой программы осуществляется с помощью иконок инструментальных панелей, «горячих» клавиш или команд главного меню, выбираемых из выпадающих перечней.

Создание проекта выполняется с помощью соответствующей команды, после чего в центральной части экрана появляются две панели, из которых левая предназначена для размещения исходных координат, а правая - преобразованных (рис. 4.3).

Рис. 4.3. Рабочее окно программы ТРАНСКОР

Обе панели содержат краткую информацию о координатной системе, в которой представлены или должны быть вычислены координаты пунктов.

Начальные установки программы задают единицы измерения угловых и линейных величин, порядок их записи, входную и выходную системы координат, а также формат представления данных левой и правой панелей рабочего окна.

Данные о координатных системах задаются в специальном окне (рис. 4.4), где отображаются доступные для редактирования данные: тип системы, эллипсоид, номер и ширина зоны, осевой меридиан, и смещения по координатным осям.

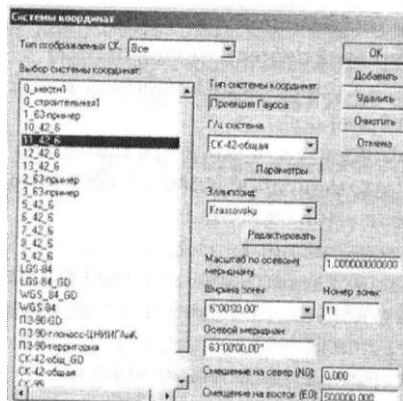


Рис. 4.4. Параметры плоских прямоугольных координатных систем

Наличие этих установок позволяет описать как СК-63, так и иные координатные зоны. Специальные средства обеспечивают возможность редактирования данных, их пополнения и пр.

Ввод данных выполняется путем последовательного занесения номеров и координат точек в соответствующие графы таблиц, либо импорта заранее подготовленных файлов в активную таблицу левой или правой панели. Программа допускает применение нескольких форматов представления дан-

ных, в том числе как внутренних, так и внешних; во втором случае допускается использование настраиваемого пользователем «свободного» текстового формата, основанного на использовании ASCII-кодов.

Обработка информации выполняется по математически строгим формулам, рассмотренным в главах 1 и 2; в случае определения параметров связи двух координатных систем используется метод наименьших квадратов и определяются остаточные расхождений координат исходных точек.

В общем случае обработка информации включает две группы задач, одна из которых предполагает преобразование координат из одной системы в другую, а вторая - отыскание параметров связи двух заданных координатных систем. В обоих случаях речь идет о координатах, представленных в любой из рассмотренных выше координатных систем: геоцентрических, эллипсоидальных (геодезических), местных или картографических, полученных путем конформного проецирования (СК-42, СК-63, СК-95 и др.).

Преобразование координат из одной системы в другую может выполняться в соответствии с формулами (1.2), (1.3), (2.3) - (2.7), (2.10) - (2.13), (4.1), (4.2), (4.5).

Для этого исходные координаты вводятся в левую панель рабочего окна (рис. 4.3) и устанавливается система, в которых они определены. После этого в правой панели задается результирующая система и с помощью команды *Операции / Преобразовать* выпадающего меню или специальной иконки инструментальной панели выполняется собственно преобразование. При этом искомые координаты автоматически заносятся в правую панель рабочего окна (рис. 4.3).

Порядок работы остается неизменным при любых преобразованиях любых координатных систем:

- из одной геоцентрической системы в другую геоцентрическую, геодезическую или картографическую на том же или ином эллипсоиде;

- из одной координатной зоны проекции в другую (в том числе с нестандартным осевым меридианом, со смещением или без смещения абсцисс), из государственной системы в местную и др.

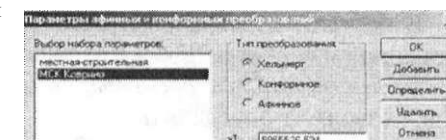


Рис. 4.5. Параметры связи МСК и государственной СК

Известные параметры преобразования координат в местную координатную систему, найденные на основе ортогональной (Гельмерта), конформной или аффинной моделей (4.6, а), (2.10) или (4.6, б) можно занести через специальное окно (рис. 4.5) и в дальнейшем использовать для перевычисления координат из одной системы в другую.

В связи с этим следует отметить, что реализованная в программе вычислительная схема определения и использования ключей местных координатных систем не в полной мере соответствует сложившейся практике, в частности:

- в программе нет информации об образующей координатной системе (относительно которой установлены ключи местной системы), и использованию ее ключей предшествует переход от исходной системы к образующей в рамках самостоятельной задачи;
- при преобразовании координат из местной системы в государственную систему и обратно пользователь должен помнить об изменении знака угла α и величины масштабного коэффициента k ;
- программа всегда определяет и использует шесть параметров связи координатных систем, и их набор не может быть изменен, даже если известно, что это не так.

Отмеченные особенности затрудняют использование ключей МСК, официально установленных при ее создании и хранящиеся в органах государственного геодезического надзора.

Полученные координаты могут быть выданы на печать или импортированы в файл для использования другими программами.

Отыскание параметров преобразования одной координатной системы в другую выполняется по общим точкам, с использованием метода наименьших квадратов. При определении параметров преобразования геоцентрических координатных систем исходное условие формируется на основе зависимостей (4.1), а картографических (в том числе местных) систем - на основе условия (4.6, а), (4.6, б) или (4.6, в).

В программе реализован способ отыскания параметров МСК, построенной на основе СК-63, в соответствии с условием (4.9).

Вспомогательные расчеты, вычисления рассматриваемой программой, позволяют определить:

- *средний радиус кривизны R* по формуле (1.5) для заданного эллипсоида и широты точки;
- *масштабный коэффициент* для редуцирования длин линий на поверхность относимости;
- *Гауссово сближение меридианов*, равное величине угла между осевым меридианом и меридианом в заданной точке.

Вычисленные значения можно копировать в буфер обмена и использовать для обработки данных.

§ 17 Преобразование картографических изображений средствами ГИС

Особенностью картографических преобразований средствами ГИС является то, что они всегда относятся не к отдельной точке или группе точек, а к слою, классу объектов или виду, т.е. к тому или иному изображению. Эти изображения могут быть представлены в растровом или векторном виде, а пространственное положение составляющих их элементов должно быть задано геодезическими (B, L) или плоскими прямоугольными (x, y) координатами.

Набор картографических преобразований и содержание соответствующих процедур существенно зависят от того, в среде какой именно геоинформационной системы они выполняются.

ГИС ArcView длительное время использовалась для ведения локальных земельно-информационных систем (ЗИС), в которых пространственное положение элементов задавалось прямоугольными координатами x, y в СК-63. В связи с этим изображений могло быть выполнено только в среде ГИС ArcView версии 3.x с подключенным модулем «*Projector!*».

При загрузке в систему данных, представленных геодезическими широтами и долготами, необходимо определить свойства вида, указав, в частности, картографическую проекцию, эллипсоид, долготу осевого меридиана, масштаб его отображения и смещения начала координат. Указанные параметры устанавливаются в окне *Свойства проекции*, доступ к которому осуществляется по клавише *Проекция* окна *Свойства вида* (рис. 4.6), открываемому командой *Вид / Свойства (View / Properties)*. При активизированном переключателе «*Стандарт*» параметры проекции устанавливаются по умолчанию; активизация переключателя «*Определяется пользователем*» открывает возможность установления их нестандартных значений.

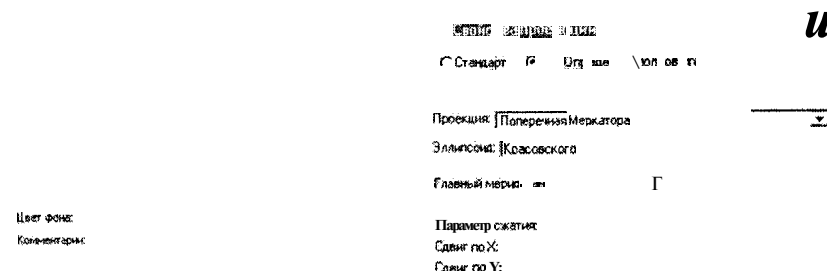


Рис. 4.6. Свойства вида (слева) и проекции (справа) проекта ArcView

С учетом этого при создании проекта и наполнении его картографической информацией необходимо установить проекцию и систему координат для данных используемых файлов и для фрейма данных (проекта).

Рис. 4.7. Установление проекции и системы координат фрейма

Соответствующий выбор осевого меридиана, масштаба его изображения и смещений по координатным осям обеспечивает возможность описания в ГИС ArcView проекции Гаусса-Крюгера, UTM, а также координатных зон СК-42, СК-95, СК-63 и местных систем координат, созданных в специальной координатной зоне (если модели дополнительных преобразований (2.6) - (2.11) и (4.6) при установлении МСК не применялись).

2. *Установление проекции и системы координат данных шейп-файла, класса пространственных объектов или растрового файла* выполняется средствами приложения ArcCatalog, в окне *Свойства шейп-файла* (рис. 4.8). С этой целью активизируется специальное поле в строке «Пространственная привязка», после чего выбирается необходимая проекция и систему координат. Как и при установлении проекции для фрейма данных, можно использовать существующий набор проекций и систем координат, выполнить редактирование некоторых параметров, или создать описание новой проекции и системы координат.

FD		Object ID	
OBJECTID			
S.O.A.C			
LOTN		Short Integer	
FORMAZZ		Short Integer	
KI-MAL			

Заполните по полю, чтобы увидеть его свойства

Свойства поля	Получен
Тип геометрии	Полигон
Среднее число точек	0
Сетка 1	10000
Сетка 2	0
Сетка 3	0
Коэффициент Z инверсии	Нет
	Нет

Пространство: Дн

Числовая область: ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ЧИСЛА

Описание: Имя поля.

76

После включения в проект файла размещенные в нем данные будут автоматически преобразованы в проекцию и систему координат фрейма.

Для описания проекций и систем координат используются ключевые слова, например: *GeoGCS* (географическая система координат); *ProjCS* (система прямоугольных координат); *Primen* (главный меридиан); *Unit* (единица измерения); *XY Planar* (вращение в плоскости XY); *Pe_Par_X_Axis_Translation* (смещение по оси абсцисс X) и др. После каждого параметра следует его значение, а их набор позволяет описать любую проекцию или преобразование, описываемое формулами (4.1), (2.12)–(2.13) и др. Так, координатная зона СК-42 определяется набором следующих ключевых слов и параметров:

```
PROJCS ["СК-42 Зона 5", GEOGCS ["GCS_Pulkovo_1942",
DATUM["D_Pulkovo_1942", SPHEROID["Krasovsky_1940",6378245,298.3]],
PRIMEM ["Greenwich", 0], UNIT ["Degree", 0.017453292519943295]],
PROJECTION ["Gauss_Kruger"], PARAMETER ["False_Easting", 5500000],
PARAMETER ["Central_Meridian", 27], PARAMETER ["Scale_Factor", 1],
PARAMETER ["Latitude_Of_Origin", -0.016666666666666666], UNIT ["Meter", 1]]
```

Поскольку в ArcGIS нет средств для описания аффинных, конформных или полиномиальных преобразований, ТКП 055-2006 (03150) «Земельно-информационная система Республики Беларусь. Порядок создания» рекомендует определять местную систему координат с поворотом и сдвигом относительно образующей системы как *равнонаправленную косую ортоугольную проекцию* (RSO - Rectified Skewed Orthomorphic, разновидность косой проекции Меркатора), разработанную для территорий Малайзии и Брунея. Параметрами проекции являются: смещения абсцисс и ординат, азимут линии пересечения цилиндра с эллипсоидом и ее масштаб, геодезическая широта и долгота начала системы и угол поворота в плоскости XY (рис. 4.9).

Эта проекция не является конформной и Руководством [25] рекомендуется для отображения сравнительно узкой полосы вдоль центральной линии. Серьезными неудобствами ее применения является невозможность проецирования на избранную поверхность относимости и необходимость предварительного вычисления геодезической широты и долготы начальной точки местной системы координат.

Описания проекций и систем координат готовятся с помощью текстового редактора или средствами ArcGIS и хранятся в файлах с расширением «.prj»; их выбор для использования при описании данных и фрейма осуществляется по идентификаторам, отражающим сущность преобразований, наименование зоны (системы) и пр.

Изложенное определяет последовательность операций по преобразованию изображения из одной проекции (координатной системы) в другую, которая включает:

- установление проекции и системы координат исходного файла;
- установление проекции и системы координат, в которой должен быть представлен фрейм данных;
- загрузку исходного файла и, при необходимости, его сохранение.

Поскольку сохранение данных выполняется в системе координат и проекции фрейма, поставленную задачу можно считать достигнутой.

Аналогичная схема используется для установления проекции и системы координат растрового изображения.

Г И С MapInfo имеет практически такие же возможности в части, касающейся преобразования картографических изображений: они выполняются «на лету» по заданным проекциям и координатным системам данных и отображения, сведения о которых записаны в строки текстового файла *Mapinfo.prj*. Элементы строки записываются в строго определенном порядке, отделяются один от другого запятыми и представляются фиксированными кодами (тип проекции, регион, единицы измерения и др.) или численными значениями (смещения, параметры преобразования и пр.).

Ниже представлены три строки файла, в которых определены параметры пятой и шестой 6-градусных зон; в третьей строке описана образующая система СК-63 и полученная путем ее ортогонального преобразования местная система координат.

```
"Зона 5 СК-42", 1008, 1001, 7, 27, 0, 1, 5500000, 0, 7
"Зона 6 СК-42", 1008, 1001, 7, 33, 0, 1, 6500000, 0, 7
"МС Кг. Ухта", 1008, 1001, 7, 24, 0, 1, 11852.98,-5946764.48, 7,
0.999994834,-0.003214310, 5643.48,
0.003214310, 0.999994834, 450.15
```

Пополнение файла *Mapinfo.prj* сведениями о НОВЫХ проекциях и координатных системах выполняется с помощью любого текстового редактора.

Name:	Value
Scale_Factor	1.0000000000000000
Longitude_Of_Origin	27.000000000000000
Latitude_Of_Origin	55.000000000000000
	12.000000000000000
	Meter
	1
Geographic Coordinate System	
	Angular Unit Degree (0 01 7453292519943295)

Рис. 4.9. Параметры МСК в ArcGIS

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Определите понятия «геоид», «эллипсоид», «поверхность относимости».
2. Назовите системы планетарных координат и дайте им общую характеристику (начало координат, положение координатных осей и плоскостей).
3. Чем отличаются астрономические широты и долготы от геодезических?
4. Назовите системы высот и определите связи между ними.
5. Каковы условия ориентирования эллипсоида в теле Земли? В чем различия между общеземным и референсным эллипсоидом?
6. Дайте общее определение конформных проекций. Приведите примеры таких проекций.
7. Как устанавливаются зональные системы координат проекции Гаусса–Крюгера?
8. Дайте общую характеристику систем координат 1942, 1963, 1995 годов и местных систем.
9. В чем отличия проекции UTM от проекции Гаусса–Крюгера?
10. Перечислите способы установления связи местных координатных систем с государственной системой и дайте им общую характеристику.
11. Что такое «компенсированная местная система координат»?
12. Дайте общую характеристику государственной геодезической сети, перечислите ее компоненты и точностные параметры ФАГС, ВГС, СГС, АГС.
13. В чем специфика городских геодезических сетей, какова их структура и точность?
14. Перечислите основные компоненты спутниковых систем и дайте им общую характеристику.
15. Расскажите о структуре сигналов L_1 и L_2 систем GPS и ГЛОНАСС.
16. В чем сущность фазовых и кодовых измерений?
17. Каковы основные источники погрешностей спутниковых измерений?
18. Расскажите о принципах абсолютных и относительных определений, достигаемой ими точности и методах ее повышения.
19. Что такое «геометрический фактор»?
20. Как вы понимаете сущность режимов кинематики и статики?
21. Перечислите задачи, решаемые спутниковыми приемниками и расскажите о их типах.
22. В чем принципиальные отличия одночастотных и двухчастотных, односистемных и двухсистемных спутниковых приемников.
23. Каков порядок погрешностей определения координат и высот, обеспечиваемых спутниковыми приемниками?
24. Покажите принципиальную схему преобразования геоцентрических координат.
25. Расскажите о математических моделях, используемых для восстановления ключей местных координатных систем.
26. Каковы общие схемы преобразования плоских прямоугольных координат из одной системы в другую ($СК-42_6 \leftrightarrow СК-42_3$, $СК-42_6 \leftrightarrow СК-42_6$, $СК-42_6 \leftrightarrow СК-63$).
27. В чем заключается принцип определения ключей МСК, установленных на основе картографических преобразований?
28. В чем принципиальные различия между ортогональной (Гельмерта), конформной, аффинной и полиномиальной моделями определения ключей связи координатных систем?
29. Каковы задачи программы ТРАНСКОР? В чем заключается специфика вычислительной обработки.
30. Перечислите задачи, решаемые программой ТРАНСКОР.
31. Как выполняются координатные преобразования средствами ГИС ArcView? ArcGIS?
32. Как задается местная система координат в среде ГИС ArcGIS, MapInfo?

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Том 1. - М., ФГУП «Картгеодезцентр», 2005, с. 334; Том 2, М., ФГУП «Картгеодезцентр», 2006, с. 360.
2. Герасимов А. П. Уравнивание государственной геодезической сети. - М., «Картгеодезцентр» - «Геодезиздат», 1996, с. 216.
3. Глушков В. В., Насретдинов К. К., Шаравин А. А. Космическая геодезия: методы и перспективы. - М., Институт политического и военного анализа, 2002, с. 448.
4. Государственная геодезическая сеть Республики Беларусь. Основные положения. СТБ 1653-2006. - Госстандарт Республики Беларусь, 2006, с. 8.
5. Зданович В. Г., Белоликов А. Н., Гусев Н. А., Звонарев К. А. Высшая геодезия / Под редакцией В. Г. Здановича. - М., Недра, 1970, с. 512.
6. Инженерная геодезия. Под ред. проф. Д. Ш. Михелева. - М., Высшая школа, 2000, с. 464.
7. Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР. - М., Недра, 1966.
8. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. ГКИНП – 02 – 033 – 79. - М., Недра, 1985, с. 152.
9. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. ГКИНП (ОНТА)-02-262-02. - М., ЦНИИГАиК, 2002, с. 55.
10. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. ГКИНП (ГНТА) - 03-010-03. - М., ЦНИИГАиК, 2004, с. 226.
11. Ключин Е. Б., Куприянов А. О., Шлапак В. В. Спутниковые методы измерений в геодезии. Часть I. - МИИГАиК, 2006, с. 60.
12. Куштин И. Ф. Геодезия (учебно-практическое пособие). - М., 2001, с. 448.
13. Макаренко Н. Л., Демьянов Г. В. Построение высокоточной системы геодезических координат на территории Российской Федерации // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования, М., 2007, № 3 (26), с. 68 – 71.
14. Макаренко Н. Л., Демьянов Г. В. Система координат СК-95 и пути дальнейшего развития государственной геодезической сети // www. gisa. ru/12933. html
15. Минько В. Определение параметров связи между государственной и местными системами координат в населенных пунктах // Земля Беларуси, Мн., 2004, № 3 с. 26 - 30.
16. Мкртычян В. Спутниковые системы позиционирования: основные принципы и возможности // Земля Беларуси, Мн., 2004, № 1 (с. 22 - 26), № 2 (с. 20 - 23).
17. Непоклонов В. Б. Определение высот с использованием моделей геоида // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования, М., 2007, № 3 (26), с. 56 - 61.
18. Основные положения о государственной геодезической сети Российской Федерации. ГКИНП (ГНТА)-01-006-03. - М., ЦНИИГАиК, 2004, с. 14.
19. Правила установления местных систем координат (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 3 марта 2007 г. № 139).
20. Пыко Т. В. Основные направления модернизации государственной геодезической сети Республики Беларусь. // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования, М., 2008, № 1 (28).
21. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС / GPS. ГКИНП (ОНТА)-01-271-03. - М., ЦНИИГАиК, 2003 с. 65.

22. *Серapiнас Б. Б.* Глобальные системы позиционирования. Изд. 3-е, исправленное и переработанное. - М., 2002, с. 104.

23. *Тревого И. С., Шевчук П. М.* Городская полигонометрия. - М., Недра, 1986, с. 200.

24. *ТРАНСКОР I. I.* Трансформация геоцентрических, геодезических и прямоугольных координат и определение параметров трансформации. Учебно-практическое пособие. - Мн., СП «Кредо-Диалог», 2006, с. 64.

25. ArcGIS 9. ArcCatalog, руководство пользователя (перевод DATA+). - ESRI, 2003 – 2004, с. 265.

Интернет: WWW.gpscom.ru,
WWW.gts.ru,
WWW.dkzz.gov.ua
WWW.prin.ru,
WWW.gisa.ru,
WWW.uomz.ru,
WWW.allgeo.ru,
WWW.gis2000.ru,
WWW.jena.ru,
WWW.navgeocom.ru,

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. СИСТЕМЫ ПЛАНЕТАРНЫХ КООРДИНАТ	5
§ 1 Земной эллипсоид и его параметры	5
§ 2 Общеземные системы координат	7
§ 3 Ориентация эллипсоида в теле планеты	11
§ 4 Системы высот	14
Глава 2. СИСТЕМЫ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ КООРДИНАТ	17
§ 5 Конформная проекция Гаусса-Крюгера	17
§ 6 Системы плоских прямоугольных координат	21
§ 6.1 Система координат 1942 года	21
§ 6.2 Система координат 1995 года	23
§ 6.3 Система координат проекции UTM	25
§ 7 Местные системы координат	26
§ 7.1 Установление МСК методом ортогональных преобразований	26
§ 7.2 Установление МСК методом конформных преобразований	28
§ 7.3 Установление МСК путем изменения параметров проецирования (СК-63)	28
§ 7.4 Другие методы установления МСК	30
§ 7.5 Местные координатные системы Республики Беларусь	32
Глава 3. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ	34
§ 8 Основные характеристики государственных геодезических сетей Российской Федерации и Республики Беларусь	34
§ 9 Геодезические приборы	39
§ 10 Методы спутниковых измерений	45
§ 10.1 Основные принципы и методы спутниковых измерений	45
§ 10.2 Компоненты системы спутникового позиционирования	47
§ 10.3 Содержание и точность спутниковых измерений	49
§ 10.4 Методы позиционирования	52
§ 11 Спутниковые приемники	56
Глава 4. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ	62
§ 12 Перевычисление геоцентрических координат	62
§ 13 Перевычисление координат из одной зоны проекции Гаусса-Крюгера в другую	65
§ 14 Перевычисление из государственной системы координат в местную и обратно	66
§ 15 Определение параметров связи местной и государственной координатных систем	66
§ 16 Программные средства преобразования координатных систем	70
§ 17 Преобразование картографических изображений средствами ГИС	75
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	80
ЛИТЕРАТУРА	81